

FAT-Schriftenreihe 378

Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante
Bordnetzarchitekturen



Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen

Forschungsstellen

Fraunhofer-Institut Integrierte Schaltungen IIS
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS Dresden
Dr. Peter Schneider

Universität Kassel
Fachbereich Elektrotechnik/Informatik
Fachgebiet Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik
Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz / apl.-Prof. Dr.-Ing. Mohamed Ayeb

TU Dortmund
Arbeitsgebiet Bordsysteme
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Vorbemerkung

Das Vorhaben wurde begleitet durch den FAT-Arbeitskreis

- VDA/FAT AK 30 "Elektrische Energie" im Cluster „Umwelt, System Straßenverkehr“
Sprecher des Arbeitskreises: Herr Dr. Martin Düsing

Beteiligte Forschungsnehmer waren

- Fraunhofer-Institut Integrierte Schaltungen IIS,
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS Dresden
Leiter des Institutsteils: Dr. Peter Schneider
Münchner Str. 16
01187 Dresden
- Universität Kassel
Fachbereich Elektrotechnik/Informatik
Fachgebiet Fahrzeugsysteme und Grundlagen der Elektrotechnik
Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz / apl.-Prof. Dr.-Ing. Mohamed Ayeb
Wilhelmshöher Allee 73
34121 Kassel
- TU Dortmund
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei
Arbeitsgebiet Bordsysteme
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Otto-Hahn-Straße 4
44227 Dortmund

Der Bericht gliedert sich nach den einleitenden Bemerkungen in 3 Teile, die den drei Arbeitspaketen entsprechen.

- AP1 Systemkonzepte und Architektur-Exploration
- AP2 Sensorik im Bordnetz und Datenverarbeitung
- AP3 Evaluierung der Diagnosefunktion durch virtuelles Testen

Die an dem Vorhaben Mitwirkenden der beteiligten Forschungsnehmer danken der Forschungsvereinigung Automobiltechnik im Verband der Automobilindustrie e.V. für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten und den Mitgliedern des VDA/FAT-AK30 für die inhaltliche Begleitung.

Überblick

Nach Jahrzehnten praktisch unveränderter Bordnetz-Architekturen in Fahrzeugen, erleben diese in den letzten Jahren rasante Weiterentwicklungen. Eine zentrale Entwicklung in diesem Zusammenhang ist sicherlich die Elektromobilität. In dem Moment wechselte die elektrische Energie ihre Rolle von einer unterstützenden Funktion hin zur zentralen Energiequelle für den Antrieb. Vollkommen neue Konzepte für die Versorgung, Verteilung und Absicherung der Energie mussten daraufhin erarbeitet werden. Dadurch sind auch vollkommen neue Nutzungsprofile hinzugekommen. Ein weiterer Faktor ist die zunehmende Anzahl an Assistenzfunktionen im Fahrzeug sowie die fortschreitende Digitalisierung vorhandener Funktionalitäten. Sie benötigen immer umfangreichere Sensorik, die im gesamten Fahrzeug verteilt ist, um jederzeit ein vollständiges Bild von der Umgebung zu haben. Diese Sensorik ist zu jedem Zeitpunkt sicher und verlässlich mit elektrischer Energie aus dem Bordnetz des Fahrzeugs zu versorgen. Nur so lassen sich die Assistenzfunktion mit der notwendigen Sicherheit bereitstellen.

Damit wird das elektrische Bordnetz zunehmend Teil der Sicherheitsarchitektur des Fahrzeugs und muss bei der Auslegung und Bewertung der Funktionalen Sicherheit integraler Bestandteil sein. Entsprechend der Bedeutung der einzelnen Sensoren, Verarbeitungseinheiten und Aktoren für die Aufrechterhaltung von Fahrfunktionen ist auch deren Stromversorgung mit dem notwendigen Sicherheitsniveau auszulegen.

Allerdings erfordern nicht alle Funktionen im Fahrzeug das gleiche Sicherheitslevel. Elektronische Steuergeräte für Antrieb, Bremsfunktionen oder Umfeld-Überwachung sind mit einer wesentlich höheren Verfügbarkeit auszulegen als beispielsweise Unterhaltungsfunktionen oder Innenraum-Beleuchtung. Die Auslegung der Stromversorgung richtet sich am notwendigen Sicherheitslevel aus. Eine bis vor kurzem häufig angestrebte Bordnetzarchitektur richtete verschiedene Domänen ein. Solche Domänen wurden nach Funktionen, nach Bauraum, nach notwendigem Verfügbarkeitslevel (Safety) oder nach erforderlichem Sicherheitslevel (Security) zusammengefasst. Diese Domänenarchitektur hat Vorteile hinsichtlich

- Funktionen des Fahrzeugs lassen sich strukturieren, zusammenfassen und clustern
- Ein Steuergerät kann die Funktionen dieses Clusters übernehmen
- Es lassen sich unterschiedliche Sicherheitsniveaus berücksichtigen

Aktuell werden aber eher Zonenarchitekturen oder sogar Zentralarchitekturen angestrebt. Ziel ist es jeweils, ein Optimum aus notwendigem Aufwand und erreichbarer Verfügbarkeit von Funktionen zu erreichen.

Entsprechend spricht die „Roadmap für die Automobilität der Zukunft“ des VDA [1] von der Notwendigkeit weiterer Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugbordnetze: „Zugleich sind Fortschritte bei redundanten und zunehmend zentralisierten Bordnetzen vonnöten. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Verringerung der Komplexität, der Verkürzung von Latenzzeiten und der Erhöhung der Zuverlässigkeit.“

In jedem Fall muss sich die Architektur des elektrischen Versorgungsnetzwerks an der Architektur des Informationsbordnetzes anlehnen. Das notwendige Sicherheitslevel ist einzuhalten, die räumliche Strukturierung sollte angepasst werden, um nur einige Aspekte zu nennen.

Demensprechend werden bei der Identifizierung zukünftiger Forschungsbedarfe in der E/E-Systemarchitektur der VDA-Roadmap beide Netze in einem Atemzug genannt: Skalierbare zentrale Architektur des Energie- und Datenbordnetzes [1]: „Dieses Technologiefeld umfasst die Entwicklung ausfallsicherer, selbstheilender und ressourceneffizienter E/E-Architekturen zur Steuerung automatisierter Fahrfunktionen. Dazu zählen Energie- und Bordnetze mit einer synergetischen Kombination zentraler und zonaler Topologien.“

Somit ist das Energiebordnetz ein wichtiger Teil der Gesamt-Architektur eines Fahrzeugs. Es muss von seinen Eigenschaften und seinen Parametern her bei der Auslegung in das gesamte E/E-Konzept integriert werden. Das Energiebordnetz ist auch Teil der Sicherheitsarchitektur des Fahrzeugs und muss dessen Anforderungen umsetzen.

Daraus ergeben sich zukünftig auch erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des elektrischen Bordnetzes. Redundanzen für Ressourcen und Verbindungen zusätzlich einzuplanen hilft dabei, auf diese Anforderungen bereits in der Auslegung des Bordnetzes zu reagieren. Gleichzeitig wird die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit künftig durch konsequente Überwachung des Bordnetz-Zustandes während des Betriebs des Fahrzeugs abgesichert. Ziel ist es, jederzeit den Status der Verfügbarkeit von Funktionen im Blick zu haben und einen beginnenden Schaden bereits frühzeitig zu detektieren, möglichst bevor eine Funktion ausfällt. Mögliche Reaktionen wären dann eine Signalisierung des drohenden Ausfalls oder das rechtzeitige Umschalten auf eine vorhandene Rückfallebene. Damit könnte über eine sichere Detektion („fail safe“) hinaus sogar ein sicherer Weiterbetrieb („fail operational“) ermöglicht werden.

Eine laufende Überwachung des Bordnetzes im Betrieb des Fahrzeugs bedeutet wiederum, dass zusätzliche Sensorik im Fahrzeug nötig ist und weitergehende Methoden zur Diagnose erforderlich sind. In erster Linie braucht es ein durchgängiges Diagnosekonzept, um die folgenden Fragen anzugehen:

- Welche auftretenden Schäden lassen sich überhaupt live im Betrieb detektieren?
- Welche drohenden Ausfälle können mit welcher Sicherheit mittels entsprechender Diagnose im Vorfeld erkannt werden?
- Welche Sensorik wird für eine verlässliche Erkennung welcher Fehlerfälle benötigt?
- Welchen zusätzlichen Aufwand an Rechenkapazität braucht es, um anfallende Daten von Sensoren auszuwerten, zu bewerten und Schlussfolgerungen abzuleiten?
- Wie kann die Überwachung des Bordnetzes an dessen spezifischer Struktur ausgerichtet werden?

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurden diese und weitere Fragen betrachtet. Ziel war es, Konzepte für solche Diagnose-Ansätze zu untersuchen sowie Prinzipien und Vorgehensweisen für eine entsprechende Sensorik zu entwickeln. Um die Wirksamkeit vorgeschlagener Ansätze effizient untersuchen zu können, wurden flankierend Methoden zur Modellbildung und Simulation bereitgestellt, die eine frühzeitige Bewertung der Ansätze erlauben.

In AP1 „Systemkonzepte und Architektur-Exploration“ wurde zunächst der Grad der zu untersuchenden Redundanz definiert. Anschließend wurde ein generisches, physikalisches Modell entwickelt, das es erlaubt, alle möglichen Topologien im Normalbetrieb und unter allen identifizierten Fehlerzuständen automatisiert zu simulieren. Das ermöglicht eine vergleichende Bewertung von Bordnetz-Topologien bezüglich der Erkennung und Behandlung von Fehlern. Insbesondere werden solche Fehler betrachtet, die zum Ausfall der elektrischen Energieversorgung und damit zur Beeinträchtigung der funktionalen Sicherheit führen können. Um dies automatisiert für tausende von Topologien durchführen zu können, sind Algorithmen zur Fehlererkennung und -behandlung auf logischer Ebene entwickelt und implementiert worden. Unterstützend sollte dabei eine zielgerichtete, einfache Simulation eingesetzt werden.

AP2 „Sensorik im Bordnetz und Datenverarbeitung“ wurden neue Diagnosekonzepte anhand vorhandener Sensorik im Energiebordnetz untersucht. Der Fokus lag auf der Analyse und Be-

wertung des Zustands des Eingangsschutzes von Energiebordnetzkomponenten mit regelbasierten KI-Verfahren. Es sind physikalische Fehler betrachtet worden, wie sie in Eingangsschaltungen von Lastkomponenten des Bordnetzes vorkommen. Zunächst wurde analysiert, wie sich solche Fehler auswirken und wie sie detektiert werden können. Dabei wurde der Ansatz verfolgt, die Fehler mit Hilfe von definierten Impulsen auf den Versorgungsleitungen zu erkennen. Auf die Auswertung der Impulsantworten sind Methoden des Maschinellen Lernens angewandt worden. Eine Diagnose der Degradierung der Eingangskapazität wurde demonstriert, mit der sich die bisherige Diagnostik des Energiebordnetzes erweitern lässt. Die Anforderungen an die Diagnosegenauigkeit wurden mittels Sensormodellen analysiert, die Effekte und Einflüsse einer realitätsnahen Sensorik berücksichtigen.

Im Rahmen von AP3 „Evaluierung der Diagnosefunktion durch virtuelles Testen“ wurde das Ziel einer Sicherheitsbewertung der Bordnetz-Topologien verfolgt. In einem ersten Schritt wurde zunächst eine Methodik für den virtuellen Test fehlerbehafteter Bordnetze erarbeitet. Damit lassen sich die erzeugten Topologien sowie die untersuchten Fehler mittels weitgehend automatisierter Verfahren hinsichtlich der Sicherheitsintegrität analysieren. Bei der Bewertung geht es vorrangig um die Funktionale Sicherheit, daher werden automatisiert Metriken der Fehlerintegrität und daraus abgeleitete Maße für die Diagnoseabdeckung ermittelt. Für die praktische Anwendbarkeit einer solchen Beurteilung verschiedener Bordnetzarchitekturen durch den Anwender wurde eine Nutzoberfläche erarbeitet. Diese erlaubt die Konfiguration verschiedener Fehlerszenarien, die automatisierte Durchführung von Simulationen sowie die übersichtliche Darstellung von Fehlerabdeckung und Fehlermetriken.

In der ersten 9-monatigen Projektphase wurden methodische Ansätze als Grundlage für die weitere Vertiefung und Anwendung erarbeitet. Die zweite ebenfalls 9-monatige Projektphase konzentrierte sich auf die Umsetzung der erarbeiteten Grundlagen und die Demonstration anhand von Anwendungen. Die erreichten Ergebnisse wurden jeweils auf den monatlichen virtuellen Treffen mit den Mitgliedern des Arbeitskreises diskutiert.

[1] Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) im Verband der Automobilindustrie (VDA), „Roadmap für die Automobilität der Zukunft, Grundstein einer Innovationspartnerschaft“

Teil 1

Systemkonzepte und Architektur-Exploration

Mohamed Ayeb, Ludwig Brabetz, Christian Koppe

Universität Kassel
Fachgebiet Fahrzeugsysteme und
Grundlagen der Elektrotechnik

1 Einleitung

Den steigenden Zuverlässigkeitsanforderungen an das Bordnetz wird zum einen mit strengeren Qualitätsvorgaben auf Komponentenebene bzw. mit deren redundanten Auslegung und zum anderen mit topologischen Maßnahmen auf Bordnetzebene begegnet. Zu letzteren zählen neue Versorgungsstrukturen, die Elemente wie Backbones, zonale Architektur und Redundanz, vereinzelt oder in Kombination, aufweisen. Sie haben das Potenzial durch ein rechtzeitiges und gezieltes Abschalten von Fehlern und/oder weniger relevanten Verbrauchern für eine zuverlässige Versorgung der sicherheitsrelevanten Verbraucher im Fehler- oder Überlastfall zu sorgen.

Mit den neuen Versorgungsstrukturen treten aber auch neue Herausforderungen auf. Es geht zum einen um eine bedarfsgerechte Auslegung, die nicht zu unnötig mehr Kosten und Aufwand führen soll. Es geht aber auch um die Beherrschbarkeit der neuen komplexeren Strukturen im Hinblick auf die rechtzeitige Entdeckung, Erkennung und das Einleiten geeigneter Maßnahmen im Fehlerfall. Dabei muss zum einen der Mehraufwand an Sensorik und Schalt-Aktorik ermittelt und bewertet werden und zum anderen die erforderliche Kommunikation berücksichtigt werden, wenn Fehlerfälle erst durch die Verknüpfung verteilter Informationen im Bordnetz detektiert und erkannt werden können. Bei einer unbedachten Herangehensweise kann eine Redundanz durchaus zu mehr Ausfall und Schaden führen als in einer konventionellen Bordnetz-Struktur. Es besteht daher Bedarf an geeigneten Versorgungsstrukturen und dazugehörigen Diagnosefunktionen, die mit möglichst wenig Mess- und Kommunikationsaufwand einen Fehlerfall früh- oder zumindest rechtzeitig detektieren, zuordnen und geeignete Maßnahmen einleiten können, die in jedem Fehlerfall die Aufrechterhaltung sicherheitsrelevanter Funktionen sicherstellen sollen.

Hier setzen die Arbeiten des AP1 an. Es sollen auf einer logischen Ebene, möglichst automatisiert, Bordnetzarchitekturen im Hinblick auf den Aufwand bei der Detektion, der Zuordnung und der Abschaltung von Fehlern vergleichend bewertet und das Potenzial der sicheren Versorgung von sicherheitsrelevanten Verbrauchern geprüft werden. Durch die weitgehende Automatisierung der Untersuchungen soll eine sehr große Zahl von Bordnetzen generisch erzeugt und adressiert werden können, um allgemeingültige Aussagen gewinnen zu können. Die Arbeiten basieren auf den Ergebnissen des abgeschlossenen FAT-AK30 Projekts „Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen“, bei dem es unter anderem darum ging, eine generische Beschreibung des Bordnetzes zu entwickeln, mit dem Ziel eine vergleichende Bewertung anhand der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Versorgung von Verteilerboxen durchzuführen.

Das AP1 gliedert sich in zwei Unterarbeitspakete. Im ersten Unterarbeitspaket AP1.1 wurde eine geeignete, generische Beschreibung der Bordnetztopologie im Hinblick auf die durchzuführenden Untersuchungen entwickelt und implementiert.

Im Rahmen des zweiten Unterarbeitspakets AP1.2 wurden Maß- und Kritikalitätszahlen zur vergleichenden Bewertung der Topologien definiert und anhand derer detaillierte Untersuchungen für ausgewählte Topologien durchgeführt.

2 Generische Beschreibung von Bordnetztopologien zur Fehlerbehandlung

Um die entwickelten methodischen Ansätze demonstrieren, untersuchen und bewerten zu können, bedarf es die Definition eines Rahmens für die zu untersuchenden Topologien. Dabei werden typische moderne Bordnetzarchitekturen identifiziert und die Komponenten eines

Bordnetzes zusammengestellt, das für die Untersuchungen relevant sein wird. Dazu gehört die Festlegung der:

- Anzahl der Spannungsebenen
- Anzahl der Quellen und Speicher im Bordnetz
- Anzahl der Verteilerboxen (Power Distribution Units PDUs)
- Anzahl der Verbraucher und deren Einordnung in sicherheitsrelevante und nicht sicherheitsrelevante Verbraucher
- Die Zuweisung der Verbraucher zu den PDUs

Um auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts aufbauen zu können, wurde der Topologie-Rahmen weitgehend beibehalten. Der dort festgelegte Rahmen ermöglicht die Auswahl einer 12V-Bordnetzarchitektur, bei der verschiedenartige Redundanzen berücksichtigt werden können. Die folgende Auflistung gibt den Topologie-Rahmen vor:

- Es wird eine Spannungsebene betrachtet
- Die Anzahl der PDUs wird auf vier festgelegt
- Die Anzahl der Quellen und Speicher wird auf zwei festgelegt
- Die Verbindungen zwischen den Verteilerboxen können redundant ausgelegt werden.
- Die Zuweisung der Verbraucher zu den Verteilerboxen wird wie im vorigen Projekt beibehalten

Es wurde zwar bei der Implementierung und der Simulation von einer 12V-Spannungsebene ausgegangen. Weitere Spannungsebenen können natürlich analog behandelt werden, wobei spezifische Fehlerbilder bei höheren Spannungsebenen wie serielle und parallele Lichtbögen den gesondert betrachtet werden müssen.

Die innere Verschaltung einer Verteilerbox (PDU) ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

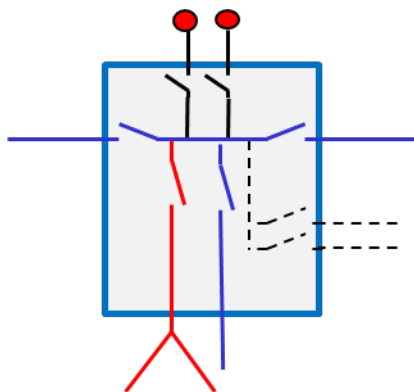


Abbildung 1: Generische PDU mit allen potentiellen Schaltern und Verbindungen

Eine PDU verfügt über eine Potentialverteilschiene, über die die Verbraucher, die Quellen und die weiteren PDUs verbunden werden können. Die Verbraucher sind über die schwarz-gestrichelten Verbindungen mit der Potentialverteilschiene verbunden. Eine PDU kann direkt über die schwarzen Verbindungen mit einer oder zwei Spannungsquellen verbunden werden. Sie kann auch mit den drei anderen PDUs über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, sogenannte schaltbare Verbindungen, verbunden werden (blaue Verbindungen). Darüber hinaus kann sie über einen Versorgungs-Backbone mit den anderen PDUs verbunden werden. Eine PDU verfügt, wie in der Abbildung zu sehen, über mehrere Schalter, damit sie sich im Fehlerfall von den

defekten Quellen, bzw. Verbindungen trennen kann. Die Schalter werden der PDU nur dann zugewiesen, wenn sie bei der jeweiligen Topologie notwendig sind. Auch wird zunächst jedem Schalter eine Strommessung zugewiesen und eine Spannungsmessung an der Verteilerschiene angenommen. Zur Detektion (Messmittel) und zur selektiven Behandlung (Schalter) der Fehler wird für jede Topologie eine Minimal-Sensorik und -Schalterlogik abgeleitet und in den Kosten der Topologie berücksichtigt, die zusammen mit der Wahrscheinlichkeit eines Versorgungsausfalls einer PDU zur Bewertung der jeweiligen Topologie dienen.

Dadurch ergibt sich eine generische Topologie, wie sie in Abbildung 2 gezeigt ist.

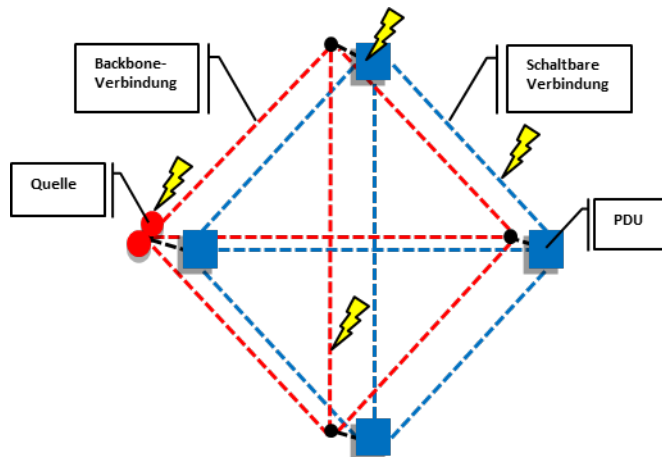


Abbildung 2: Generische Bordnetztopologie mit allen möglichen Verbindungen und den zu betrachtenden Fehlerfällen

Eine bestimmte Kandidaten-Topologie ist durch die Beantwortung folgende Fragen festgelegt:

- werden die zwei Spannungsquellen an eine PDU oder an zwei verschiedene PDUs angeschlossen?
- wie wird jede PDU über schaltbare Verbindungen und und/oder Backbone-Verbindungen mit den anderen PDUs verbunden?

Durch die Kombination aller sich ergebenden Möglichkeiten erhält man insgesamt 8192 Topologien. Davon wurden 398 Topologien als irrelevant aussortiert, weil sie auch ohne Fehlerfälle nicht die Versorgung aller PDUs sicherstellen. Die restlichen 7794 Topologien wurden für die weiteren Untersuchungen übernommen.

An die PDUs sind sicherheitsrelevante und nichtsicherheitsrelevante Verbraucher angeschlossen. Deren Auswahl und Zuweisung zu den PDUs wurden aus dem vorigen Projekt übernommen und sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

	Sicherheitsrelevante Verbraucher (sR)	Stromaufnahme der sR Verbraucher [A]	Stromaufnahme der nicht sR Verbraucher [A]	Gesamtstrom [A]
PDU1	Lenkung	25	10	35
PDU2	Lenkung (redundant) und ESP	10+25	20	55
PDU3	Systemrechner/Fahrerassistenzsysteme	15	30	45
PDU4	-	-	40	40

Tabelle 1: Nennströme der einzelnen Verbraucher an den PDUs.

Eine Beispieltopologie mit den vier PDUs und den zugewiesenen Strömen ist in der Abbildung 3 zu sehen. Es handelt sich um eine Linientopologie mit den zwei Spannungsquellen an den beiden End-PDUs verbunden. Es sind nur schaltbare Verbindungen und kein Backbone in diesem Beispiel vorhanden.

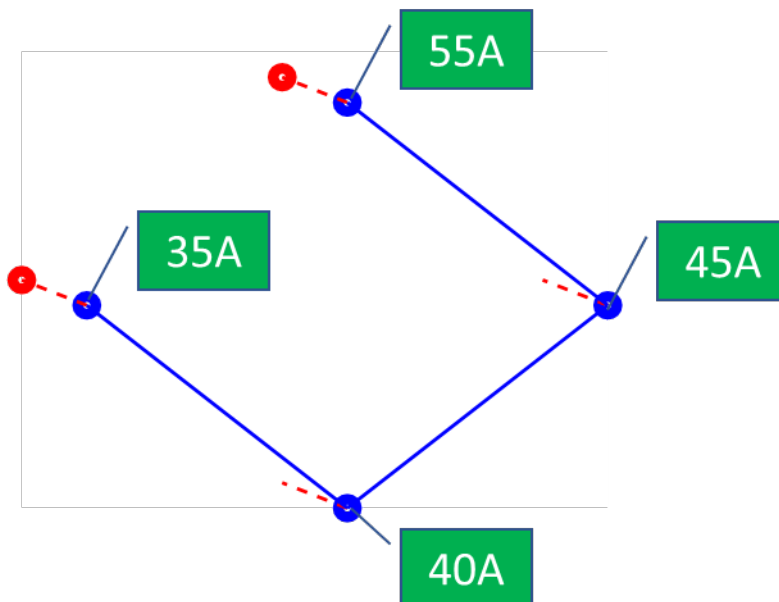


Abbildung 3: Eine Linientopologie mit den 4 PDUs und den zugewiesenen Verbraucherströmen

Zur Bewertung der Topologien werden die Kriterien Kosten und Zuverlässigkeit herangezogen. Bei den Kosten sind die relativen Mehrkosten einer Topologie zu verstehen. Die Quellen und die PDUs werden dabei außer Acht gelassen, da sie bei jeder Topologie vorhanden sind. Die Mehrkosten beziehen sich daher auf die relativen Kosten von schaltbaren und Backbone-Verbindungen. Dazu kommen die Kosten für die notwendige Sensorik zur Detektion der Fehler und deren Ortung sowie für die notwendigen Schalter zur selektiven Behandlung der Fehlerfälle. Die Minimal-Sensorik und die notwendige Schalterausstattung muss für jede Topologie automatisiert abgeleitet werden.

Das Kriterium Zuverlässigkeit adressiert hier die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer PDU durch einen internen Fehler, darunter wird im Rahmen dieser Untersuchung ein Kurzschluss auf der Verteilerschiene der PDU verstanden, oder durch den Ausfall der Versorgung als Folge eines Fehlers im Bordnetz, der topologiebedingt z.B. durch unzureichende Redundanz zum Ausfall der Versorgung der PDU führt.

Die Fehler, die hier berücksichtigt werden, sind in der Abbildung 2 durch gelbe Blitzsymbole angedeutet. Es folgt eine Liste der Fehler und der benötigten Schalthandlungen im Fehlerfall:

- Die Unterbrechung einer schaltbaren Verbindung
 - Öffnen der entsprechenden Schalter an beiden Enden der Verbindung
- Schaltbare Verbindung kurzgeschlossen
 - Öffnen der entsprechenden Schalter an beiden Enden der Verbindung
- Backbone-Verbindung unterbrochen
 - Trennen der PDU von der schadhaften Backbone-Verbindung
- Backbone-Verbindung kurzgeschlossen
 - Trennen der PDU von der schadhaften Backbone-Verbindung
- PDU-Fehler: Kurzschluss auf der Potentialvertilerschiene
 - Öffnen alle Schalter der betroffenen PDU
- Quellenfehler: Ausfall einer Quelle
 - Es wird angenommen, dass die Quellen über eine eigene Diagnose verfügen und sich selbst abschaltet. Die direkt angeschlossene PDU trennt sich von der Quelle über den vorgesehenen Schalter ab.

Um die Auswirkungen aller o.g. Fehlerfälle für alle Topologien auf die Versorgungssicherheit untersuchen zu können wird unter Simscape ein einfaches generisches Modell aufgebaut, mit dem automatisiert alle Topologien im Normalbetrieb und bei allen Fehlerfällen simuliert werden können. Das Modell zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Einfache Modellierung der Quellen (konstante Spannungsquellen mit Innenwiderständen)
- Einfache Modellierung der Leitungen (Widerstände)
- Einfache Modellierung der Fehler mit Hilfe von Schaltern zum Öffnen und Kurzschließen der Verbindungen
- Spannungsmessung an den Stromvertilerschienen der PDUs
- Strommessung an allen Schaltern der PDUs
- Alle 8192 Topologien konnten automatisch konfiguriert und simuliert werden:
 - Plausibilisierung: Summenstrom entspricht dem gesamten erwarteten Verbrauch bei den 7794 gültigen Topologien und bleibt unter dem erwarteten Verbrauch bei den restlichen Topologien, da bei denen nicht alle PDUs, auch im Normalbetrieb, versorgt werden können (Bestätigung der im vorigen Projekt algorithmisch abgeleiteten Ergebnisse).
- Simulation aller Fehlerfälle für alle Topologien und Speicherung aller Spannungs- und Stromwerte in der erweiterten Daten Datenstruktur **Top_sB_nF**

Die mitgeloggtten Spannungs- und Stromwerte stellen zunächst eine maximale Ausstattung mit Sensorik dar, die später algorithmisch auf eine Minimal-Sensorik reduziert werden wird. In der Abbildung 4 ist das generische Simscape-Modell für alle Topologien zu sehen.

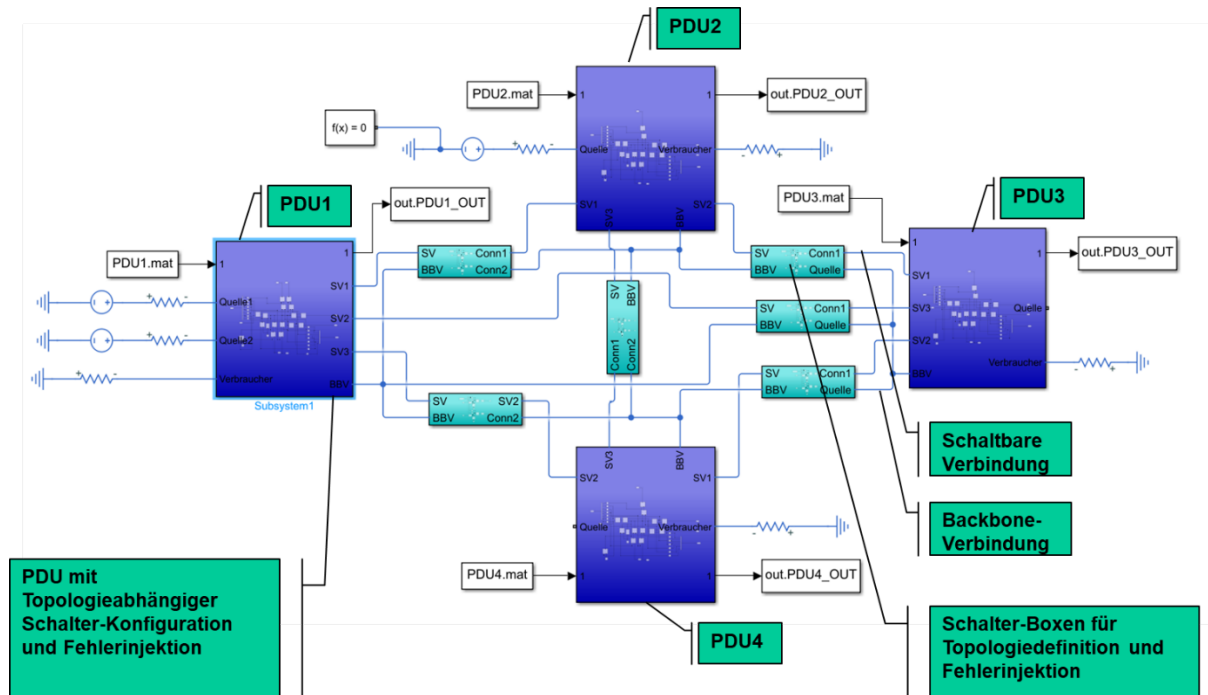


Abbildung 4: Generisches Simscape-Modell zur automatisierten Simulation aller Topologien im Normalbetrieb und bei allen Fehlerfällen

Die Datenstruktur **Top_SB_nF** ist im vorigen Projekt als Struktur des Datentyps *Structure Array* unter Matlab entstanden, da die Matlab-Umgebung sich für die Entwicklung von Algorithmen zur Topologiebewertung gut geeignet. Die Datenstruktur wurde in diesem Projekt nach und nach mit den Simulationsergebnissen im Normalbetrieb und in den Fehlerfällen sowie mit den notwendigen Schaltmaßnahmen zur Fehlerbehandlung erweitert. Die Beschreibung der Datenstruktur ist im Anhang zu finden.

3 Vergleichende Bewertung der Bordnetztopologien

Die vergleichende Bewertung der Topologien wurde im vorigen Projekt anhand der relativen Zusatzkosten, die die jeweilige Topologie verursachen (Kosten für Verbindungen und Schalter) und anhand der Zuverlässigkeit der Energieversorgung der PDUs durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass eine übergeordnete Instanz existiert, die jeden Fehler hinsichtlich Art und Lokalisierung erkennen kann und darauf basierend die notwendigen Schalthandlungen initiiert. Ob und wie dies realisiert werden und welcher Aufwand ist damit verbunden, wurde im vorigen Projekt nicht betrachtet.

Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, muss man herausfinden, ob die Fehler detektierbar sind und wenn ja welche Minimal-Sensorik zur Fehlerdetektion benötigt wird. Dabei sind zwei Konfigurationen bei der Fehlerdetektion und -erkennung zu unterscheiden. Bei einer zentralen Fehlerdetektion werden Sensordaten von überall aus den PDUs zusammengeführt und verarbeitet, während bei einer lokalen Fehlerdetektion nur auf lokale Sensordaten in der PDU zugegriffen werden kann. Beide Herangehensweisen werden hier untersucht und vergleichend bewertet.

Auch die Selektivität der Schalthandlungen im Fehlerfall stellt bei vorhandener Redundanz eine Herausforderung dar. Denn anders als in einer konventionellen Baumstruktur, wo die thermischen Sicherungen sowohl als Mess- als auch als Schaltelemente dienen und, wenn sie entsprechend den Regeln dimensioniert sind, auch für die benötigte Selektivität sorgen, in dem sie nur den betroffenen Zweig abtrennen, ist dies bei einer redundanten Versorgung keine

Selbstverständlichkeit mehr. Denn dort kann sich die Richtung des Leistungsflusses je nach Betriebsfall in fast jedem Zweig ändern und zu Null werden, ohne dass ein Fehlerfall vorliegt oder Verbraucher ganz abgeschaltet werden.

Denn bei einer sogenannten heißen Redundanz, also einer Redundanz bei der alle vorgesehenen Verbindungen und Quellen in der jeweiligen Topologie immer aktiv sind, sind die Stromwege nicht eindeutig definiert und deren Auslastung kann sich ständig ändern. Bei einer kalten Redundanz, bei der die Redundanzen nur im Fehlerfall aktiviert werden, besteht das Problem der Nichteindeutigkeit in der Regel nicht. Man riskiert aber dafür im Fehlerfall Ausfallzeiten bis die Redundanz aktiviert ist und es werden eventuelle Fehlerfälle in den inaktiven Redundanzen erst zu spät bei einem Bedarf und Aktivierung der Redundanzen erkannt.

Um die notwendige Minimal-Sensorik zur Detektierbarkeit von Fehlern und zum Auslösen der richtigen Schalthandlungen in redundanten Topologien zu identifizieren wird wie folgt vorgegangen:

- Es wird für jedes Sensorsignal ein Variationsbereich identifiziert werden, in dem es im normalen Betrieb liegen soll.
- Ebenso wird es für jedes Sensorsignal ein Variationsbereich identifiziert, in dem es in jedem der sechs Fehlerfälle liegen soll.
- Die Schalthandlungen für jeden Schalter in jedem Fehlerfall sind bekannt und in der Datenstruktur abgespeichert.
- Muss aufgrund eines Fehlers eine Schalthandlung erfolgen,
 - so wird für jedes Sensorsignal entweder lokal (d.h. in der eigenen PDU) oder global untersucht werden, ob der Variationsbereich eines Sensorsignals im Normalbetrieb durch den Fehler verlassen wird und somit ein Merkmal zur Initiierung der notwendigen Schalthandlung vorliegt.
 - Reicht die Information aus einem lokalen Sensor aus, so liegt lokale Detektierbarkeit vor.
 - Wird die Information eines Sensors aus einer anderen PDU benötigt, so liegt (einfache) Detektierbarkeit vor, die eine Kommunikation erfordert und eine Diagnosestrategie basierend auf einer zentralen Instanz erfordert.
 - Kann der Fehler anhand keines der Sensorsignale erkannt werden, so ist der Fehler nicht detektierbar.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Variationsbereiche der Sensorsignale basiert auf dem Linearen Zusammenhang zwischen Spannungen und Strömen in einem elektrischen Netzwerk (Superpositionsprinzip).

Die Verbraucher werden als Stromsenken behandelt. Ihre eventuellen internen Nichtlinearitäten brauchen nicht berücksichtigt zu werden. Es genügt die Angabe der maximalen Stromwerte.

Für jedes Sensorsignal $s(t)$ im Netzwerk, ob Strom oder Spannung, gilt daher:

$$s(t) = \alpha_1 I_1(t) + \alpha_2 I_2(t) + \alpha_3 I_3(t) + \alpha_4 I_4(t) + \alpha_5 U_1(t) + \alpha_6 U_2(t)$$

Dabei sind I_1 , I_2 , I_3 und I_4 die 4 Verbraucherströme an den 4 PDUs. U_1 und U_2 sind die zwei Spannungen der Spannungsquellen. Die Spannungen wurden hier zwar als konstant angenommen, deren eventuelle Variation im Betrieb kann aber genauso wie bei den Strömen durch minimale und maximale Werte berücksichtigt werden. Der Fokus lag aber hier eher auf die Sensorsignalvariationen bei verschiedenen Lastszenarien. Die Behandlung variabler Spannungen kann aber analog erfolgen.

Die Bestimmung von α_1 bis α_4 erfolgte im Normalbetrieb und für jeden Fehlerfall simulativ mit dem bereits vorgestellten Simscape-Modell, in dem der entsprechende Verbraucherstrom einmal auf Null und einmal auf den maximalen Wert (ein anderer Wert ungleich Null wäre auch zulässig) gesetzt wird. Die anderen Stromwerte bleiben dabei auf null gesetzt. So kann man die Sensitivitätsfaktoren α_1 bis α_4 für die vier Verbraucherströme bestimmen.

Die Wertebereiche der Sensorsignale für ein beliebiges Lastszenario ergeben sich dadurch zu:

$$s_{min} = \alpha_1 \begin{cases} I_{1,max}, & \text{wenn } \alpha_1 < 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_1 \geq 0 \end{cases} + \alpha_2 \begin{cases} I_{2,max}, & \text{wenn } \alpha_2 < 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_2 \geq 0 \end{cases} + \alpha_3 \begin{cases} I_{3,max}, & \text{wenn } \alpha_3 < 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_3 \geq 0 \end{cases} \\ + \alpha_4 \begin{cases} I_{4,max}, & \text{wenn } \alpha_4 < 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_4 \geq 0 \end{cases}$$

$$s_{max} = \alpha_1 \begin{cases} I_{1,max}, & \text{wenn } \alpha_1 \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_1 < 0 \end{cases} + \alpha_2 \begin{cases} I_{2,max}, & \text{wenn } \alpha_2 \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_2 < 0 \end{cases} + \alpha_3 \begin{cases} I_{3,max}, & \text{wenn } \alpha_3 \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_3 < 0 \end{cases} \\ + \alpha_4 \begin{cases} I_{4,max}, & \text{wenn } \alpha_4 \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } \alpha_4 < 0 \end{cases}$$

Überschneiden sich die Wertebereiche im Normalbetrieb und im betrachteten Fehlerfall nicht - ein Sicherheitsabstand muss dabei gewählt werden, der über die Messgenauigkeit der Sensorik und die erreichbare Selektivität entscheidet-, so gilt der Fehler anhand des Sensorsignals als detektierbar und die benötigte Schalthandlung kann ausgelöst werden. Überschneiden sich die Wertebereiche aller Sensorsignale, so gilt der Fehler als nicht detektierbar.

Bevor eine Gesamtübersicht der erzielten Ergebnisse präsentiert wird, wird anhand einiger Beispieltopologien die lokale, globale oder nicht Detektierbarkeit von Fehlern und deren Ursachen erläutert.

Beispiel1: Zum Vergleich sind in der Abbildung 5 zwei Topologien Nr.1 (links) und Nr.7 (rechts) angegeben.

- Bei Topologie Nr.1 ist eine Unterbrechung der ersten schaltbaren Verbindung (blaue Linie) zwischen PDU1(B1) und PDU2(B2) lokal detektierbar (grün markiert), während bei den beiden anderen schaltbaren Verbindungen eine Detektion nicht möglich ist (rot markiert), weil es Lastszenarien gibt, bei denen die jeweilige Verbindung stromlos werden kann (der Stromfluss kann sich sogar z.B. zwischen PDU2 und PDU3 umkehren, wenn die Verbraucher der PDU2 eingeschaltet sind, während die anderen Verbraucher aus sind). Ein Zustand (stromlos), der sich von einer Unterbrechung nicht unterscheiden lässt.
- Bei Topologie Nr.7 sind alle möglichen Unterbrechungen auf den drei schaltbaren Verbindungen lokal detektierbar. Ein Szenario wie bei der Topologie Nr.1 tritt nicht auf. Diese Topologie stellt eine Beispiel-Topologie dar, bei der alle Fehler lokal detektierbar sind.

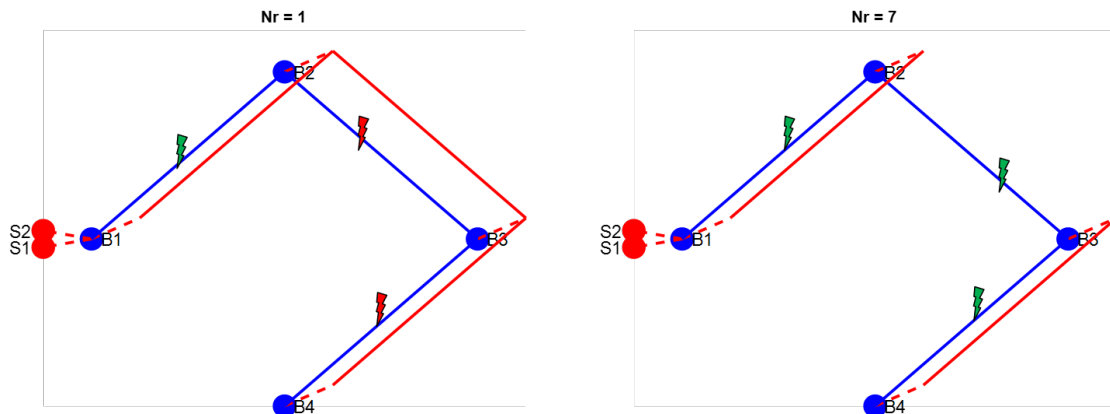


Abbildung 5: Topologien Nr. 1 und Nr. 7 zur Erläuterung von Beispiel 1

Beispiel 2: detektierbar vs. lokal detektierbar

- Eine Unterbrechung der ersten Backbone-Verbindung bei Topologie Nr. 1 (Abbildung 5) zwischen PDU1 und PDU2 ist lokal von PDU1 detektierbar, da es im Fehlerfall kein Strom mehr fließt, während im Normalbetrieb immer ein Mindeststrom fließt (Grundlast). Bei PDU2, die sich auch vom beschädigten Backbone dann trennen müsste, ist eine lokale Detektierbarkeit nicht möglich. Es fließt zwar ein Strom von PDU2 in den Backbone in umgekehrte Richtung als in den meisten Fällen im Normalbetrieb. Es gibt aber auch ein Lastszenario (Verbraucher der PDU2 sind ausgeschaltet, während die anderen Verbraucher an sind), bei dem die Stromrichtung sich auch umkehrt.
- Die Detektion von Unterbrechungen ist nicht nur aus Sicherheitsgründen wichtig, sondern in redundanten Strukturen essentiell, sonst verliert man die Redundanz ohne es zu merken.

Die Lehren aus den durchgeführten Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Quellenfehler sollen, wie in den Prämissen angenommen, von den Quellen selber erkannt und die Quellen sollen sich bei einem Quellenfehler entsprechend vom Netzwerk abtrennen.
- Die Kurzschlussfehler können, ob bei den schaltbaren Verbindungen, den Backbone-Verbindungen oder innerhalb der PDUs, alle lokal erkannt und es kann entsprechend geschaltet werden, um die Fehler zu isolieren.
- Die Unterbrechungen der schaltbaren Verbindungen und der Backbone-Verbindungen stellen die problematischen Fälle dar, wie in den oben aufgeführten Beispielen exemplarisch erklärt. Wobei hier nur eine „einfache Sensorik“ in Betracht gezogen wurde - Strom- und Spannungsmessung. Speziell auf den Unterbrechungsfall maßgeschneiderte Diagnoseverfahren wie das Injizieren von Testsignalen und die Auswertung deren Ausbreitungsverhalten oder der Einsatz spezieller Leitungen wie z.B. geschirmte Leitungen zur Detektion von Leitungsunterbrechungen sind hier nicht betrachtet worden.
- Die folgende Tabelle gibt die Anzahl der Topologien bei denen eine Fehlerart überhaupt detektierbar bzw. lokal detektierbar ist. Diese Anzahl wird im Verhältnis zur Anzahl der durch die Fehlerart betroffenen Topologien angegeben. Dabei ist zu beachten,

dass von den 8192 Topologien, die sich insgesamt durch Kombinationen ergeben haben, 7794 Topologien als gültig identifiziert worden sind, bei denen werden im Normalbetrieb alle PDU's und damit alle Verbraucher versorgt.

	detektierbar / Anz. Betroffene	lokal detektierbar / Anz. Betroffene
schaltbare Verbindung unterbrochen	772 / 7708	772 / 7708
schaltbare Verbindung kurzgeschlossen	7708 / 7708	7708 / 7708
Backbone-Verbindung unterbrochen	874 / 7708	408 / 7708
Backbone-Verbindung kurzgeschlossen	7708 / 7708	7708 / 7708
PDU-Fehler	7794 / 7794	7794 / 7794
Quellenfehler	7794 / 7794	7794 / 7794
Alle Fehler	303 / 7794	208 / 7794

Tabelle 2: Übersichtstabelle zur Detektierbarkeit von Fehlerfällen

Die detaillierten Ergebnisse dieser Untersuchung wurden der Datenstruktur hinzugefügt, wie im Anhang beschrieben.

Darauf basierend und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des vorigen Projekts (s. Abbildung 6), wobei dort die Frage der Detektierbarkeit und der dazu notwendigen Sensorik nicht behandelt wurde, wurde die Graphik Ausfallwahrscheinlichkeit vs. relative Kosten zur Bewertung der Topologien neu erstellt, um zunächst die detektierbaren Topologien kenntlich zu machen wie in der Abbildung 7 zu sehen. Hier sind zunächst weder Kosten für die Sensorik noch für eine eventuell benötigte Kommunikation berücksichtigt. Man erkennt, dass die Pareto-Front sich verschiebt, wenn nur noch die detektierbaren Topologien herangezogen werden sollen. Das zeigt vor allem, dass Redundanz zwar die Zuverlässigkeit erhöhen aber die Detektierbarkeit von Fehlern erschwert. Dies gilt natürlich vor allem für die heißen Redundanzen wie oben diskutiert.

Beispieltopologien aus der neuen Pareto-Front sind in den Abbildung 8 und Abbildung 9 zu sehen. Die Linientopologien mit den beiden Quellen an den beiden Enden aus der damaligen Pareto-Front sind nicht mehr dabei, da Unterbrechungen bei diesen Topologien mit der eingesetzten einfachen Sensorik nicht detektiert werden können.

Wenn man die Auswahl weiter einschränkt und nur noch die Topologien mit lokaldetektierbaren Fehlern zulässt, dann ergibt sich eine weitere Pareto-Front, wie in Abbildung 10 zu sehen. Es sind viele Beispiele mit zwei getrennten Netzen dabei, die die Nutzung einer weiteren, allerdings kalten Redundanz nahelegen, in dem man eine Verbindung zwischen den Netzen vorsieht, die nur im entsprechenden Fehlerfall dazugeschaltet wird.

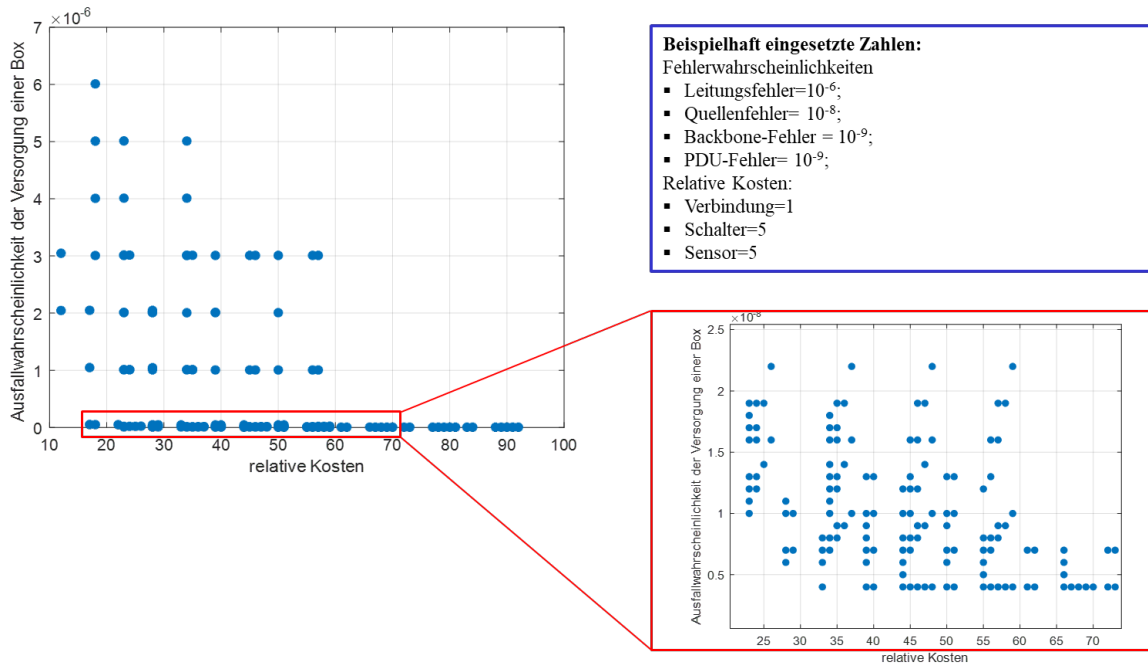


Abbildung 6: Ergebnisse der Bewertung aus dem vorigen Projekt Ausfallwahrscheinlichkeit vs. Kosten

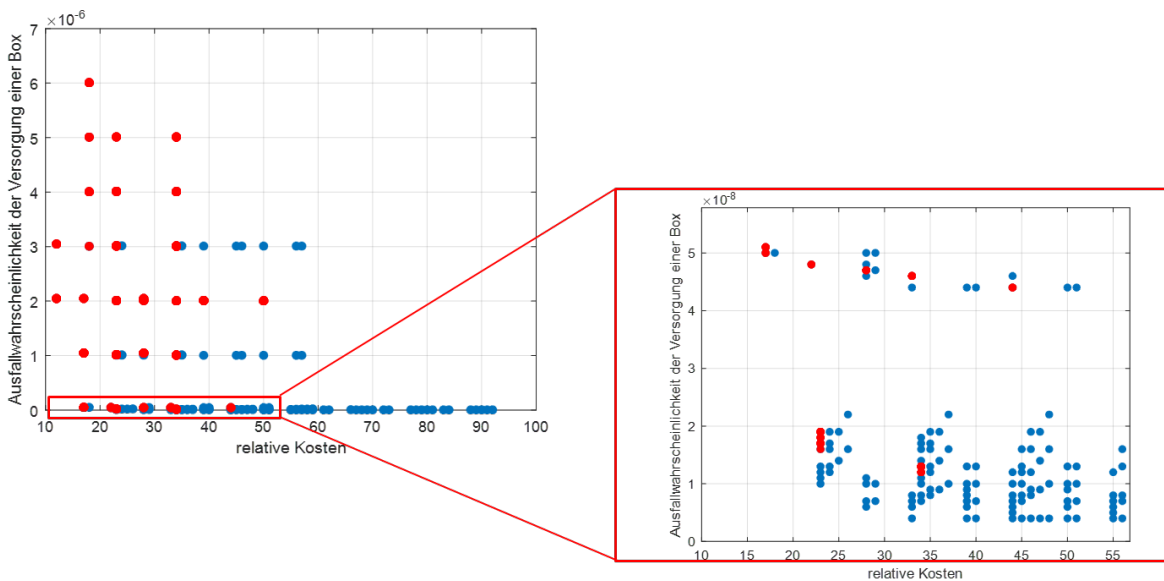


Abbildung 7: Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit vs. Kosten bei Kenntlichmachung der Topologien bei denen alle Fehler detektierbar sind (rot)

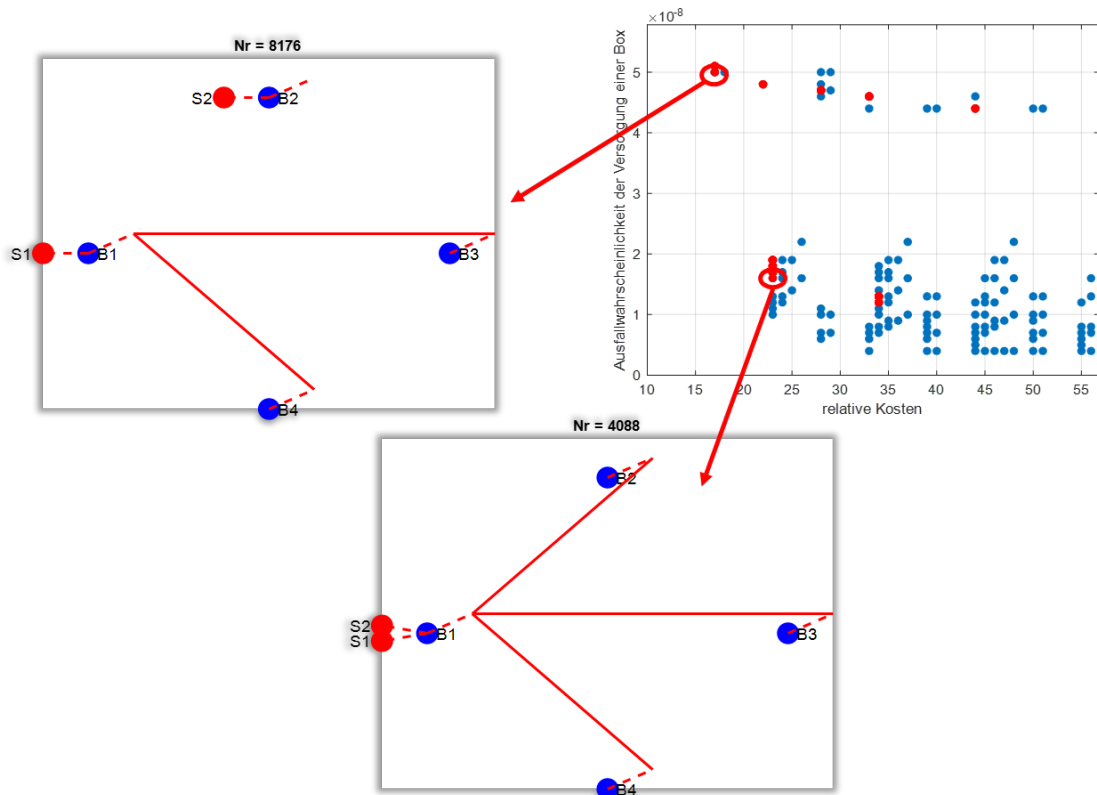


Abbildung 8: Beispieltopologien auf der neuen Pareto-Front 1/2

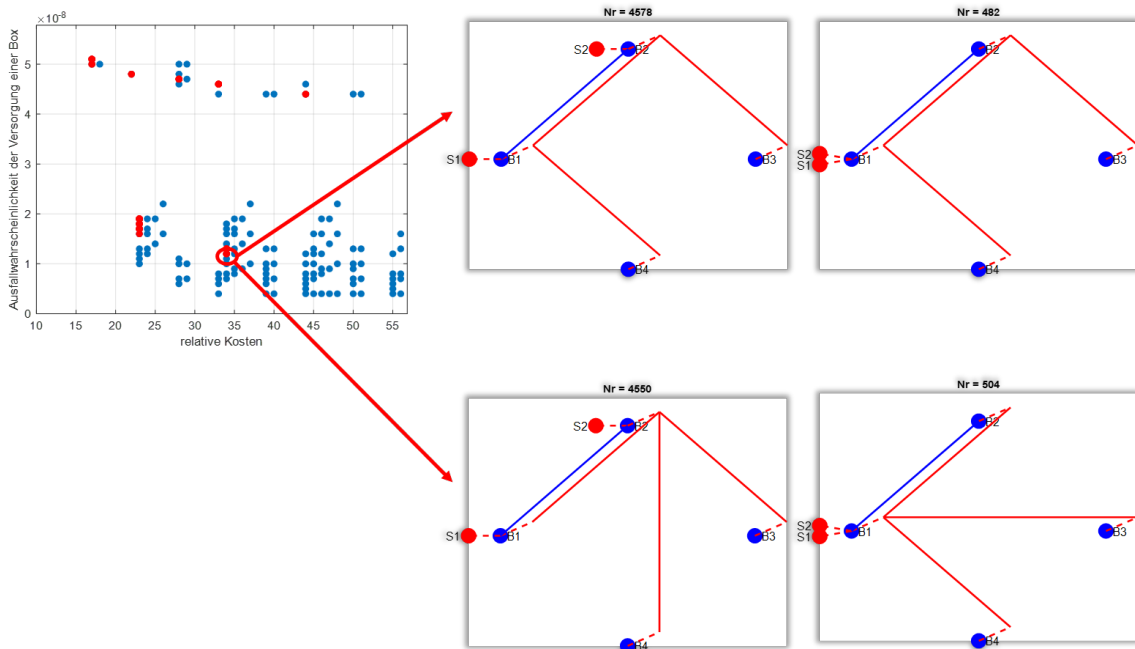


Abbildung 9: Beispieltopologien auf der neuen Pareto-Front 2/2

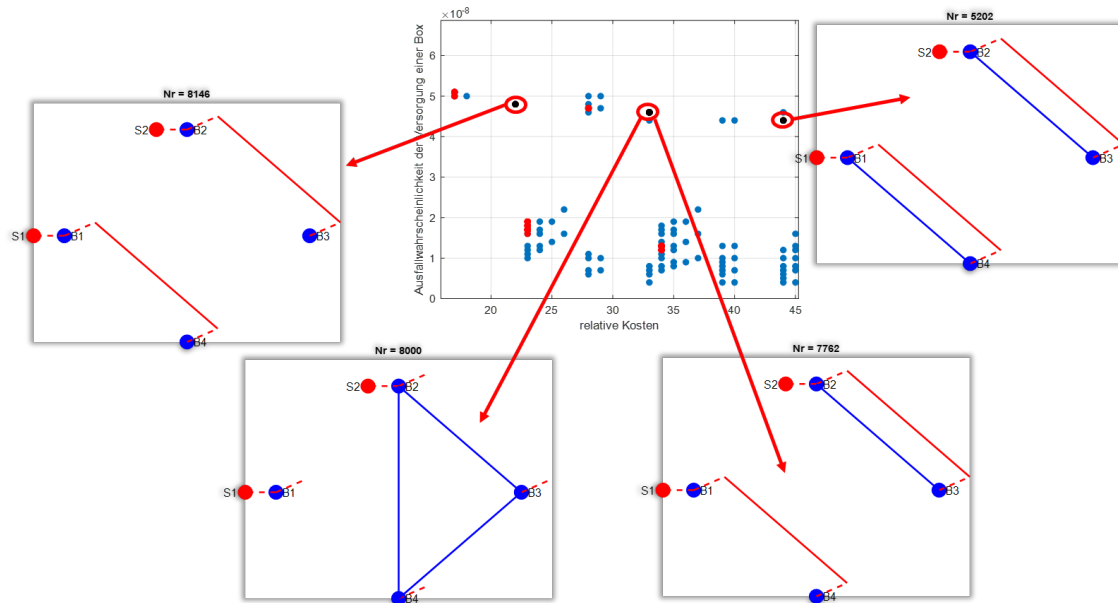


Abbildung 10: Beispieltopologien auf der Pareto-Front, wenn nur lokaldetektierbare Topologien (kein Bedarf an Kommunikation) zugelassen werden

Zum Abschluss der Untersuchungen wurde der Sensoraufwand genauer betrachtet.

Bis zu 29 Sensoren (alle Ströme und alle Spannungen an allen PDUs) wurden zunächst in der Simulation bei einer 100% -Topologie und Sensorausstattung vorgesehen.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen zur einfachen d.h. zentralen Detektierbarkeit und lokalen Detektierbarkeit konnten jeweils die minimale Anzahl an Sensoren identifiziert werden, um die notwendigen Schalthandlungen im Fehlerfall durchführen zu können, wie in der Abbildung 11 zu sehen ist.

Es werden je nach Topologie zwischen 2 und 6 Sensoren bei einfacher Detektierbarkeit (rot) benötigt, wobei hier eine Kommunikation vorausgesetzt werden muss.

Es werden je nach Topologie zwischen 6 und 12 Sensoren bei lokaler Detektierbarkeit (schwarz) benötigt, wobei hier auf eine Kommunikation zur Fehlerbehandlung verzichtet werden kann.

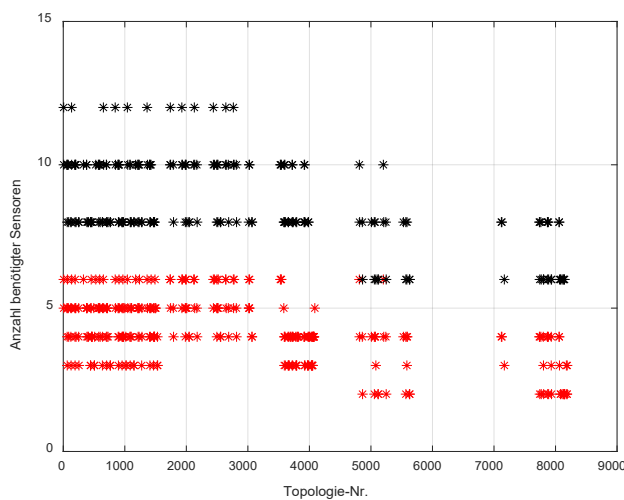


Abbildung 11: Anzahl benötigter Sensoren, rot bei zentraler und schwarz bei lokaler Detektierbarkeit

Für Topologien, bei denen die lokale Detektion von Fehlern möglich ist, stellt sich die Frage nach der Bewertung einer zentralen Fehlerbehandlung mit minimaler Sensorik aber unter Hinzunahme der benötigten Kommunikation vs. eine dezentrale Fehler-Behandlung auf PDU-Ebene, bei der die Sensorik lokal vorhanden sein muss.

Die Graphik in Abbildung 12 zeigt in rot die relativen Kosten unter Berücksichtigung der minimalen Sensorik für eine zentrale Behandlung, wobei eine Kommunikation hier nötig ist aber deren Kosten oder Ausfallwahrscheinlichkeit nicht berücksichtigt worden sind.

Die Graphik zeigt darüber hinaus in schwarz die relativen Kosten unter Berücksichtigung der benötigten Sensorik für eine dezentrale Behandlung ohne Bedarf an Kommunikation.

Für eine dezentrale Fehlerbehandlung, ohne Kommunikationsbedarf, werden 4 bis 6 Sensoren mehr benötigt. Dies entspricht einer Verdoppelung bis zu einer Verdreifachung des Sensoraufwands. Die Ergebnisse liefern bei der Abwägung zwischen lokaler und zentraler Detektierbarkeit wichtige Hinweise, was der Sensorbedarf in beiden Fällen angeht.

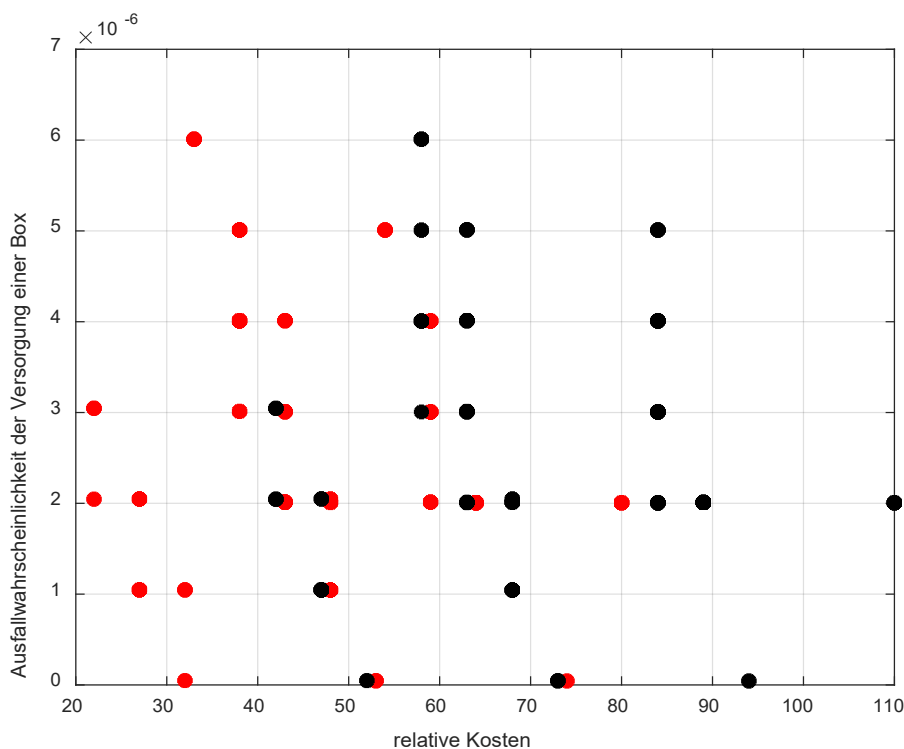


Abbildung 12: Ausfallwahrscheinlichkeit vs. relative Kosten unter der Berücksichtigung von Sensorkosten bei zentraler (rot) und lokaler (schwarz) Fehlerbehandlung

4 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorigen Projekts, bei dem eine Methodik zur automatisierten Generierung von Topologien und deren schnellen Bewertung hinsichtlich Kosten und Ausfallwahrscheinlichkeit entwickelt wurde, konnte das Problem der Fehlerdetektion, -Erkennung und Behandlung auf generischer Ebene für tausende Topologien adressiert werden. Dazu ist eine Vorgehensweise entwickelt und implementiert worden, mit deren Hilfe Variationsbereiche für alle vorgesehenen Sensorsignale im Normalbetrieb und in allen betrachteten Fehlerfällen berechnet werden können. Daraus leitet sich die Möglichkeit ab, durch Vergleich der Variationsbereiche, den Fehler zu erkennen und die nötigen Schaltheftungen vorzunehm-

men. Es zeigt sich, dass die Redundanz zwar wie erwartet die Ausfallwahrscheinlichkeit reduziert aber gleichzeitig nicht nur die Kosten, sondern auch die Komplexität der Diagnosefunktion erhöht. Vor allem im Vergleich zur konventionellen Baumstruktur des Bordnetzes bei der die thermische Sicherung als Sensor- und Abschaltelement dient ist bei einer redundanten Versorgungsstruktur mit mehr Aufwand zu rechnen.

Die Auswertungen haben darüber hinaus ergeben, dass durch die Berücksichtigung der Fehlerdetektierbarkeit und -Behandlung eine Verschiebung in der Pareto-Front stattfindet und dass Topologien, die auf der alten Pareto-Front zu finden waren, vor allem wegen der erschwerten Erkennung von Unterbrechungsfehlern weggefallen sind. Deren Wiederberücksichtigung würde den Einsatz spezieller Diagnosemethoden voraussetzen. Hier kann aber auch alternativ eine kalte Redundanz Abhilfe schaffen.

Die Bestimmung der Minimal-Sensorik für eine lokale und eine zentrale Fehlererkennung und -behandlung kann bei der Wahl der Diagnosestrategie für eine Abwägung zwischen Sensoraufwand vs. Kommunikationsaufwand genutzt werden.

Die erzielten Ergebnisse wurden in eine Datenstruktur übertragen, in der für jede Topologie die Bewertung der lokalen und zentralen Detektierbarkeit und die dazu benötigte Minimal-Sensorik zu finden sind.

Die erweiterte Methodik erlaubt dadurch eine schnelle Bewertung der Diagnoszierbarkeit der Bordnetz-Topologie auf logischer Ebene, bevor detaillierte und rechenintensivere Methoden auf ausgewählten Topologien angewendet werden.

5 Anhang

Erläuterungen zur Datenstruktur des angelegten Matlab *Structure Array Top_sB_nF*:
Die Datenstruktur wird anhand der Topologie Nr. 3503 aus der Abbildung 5 erläutert.

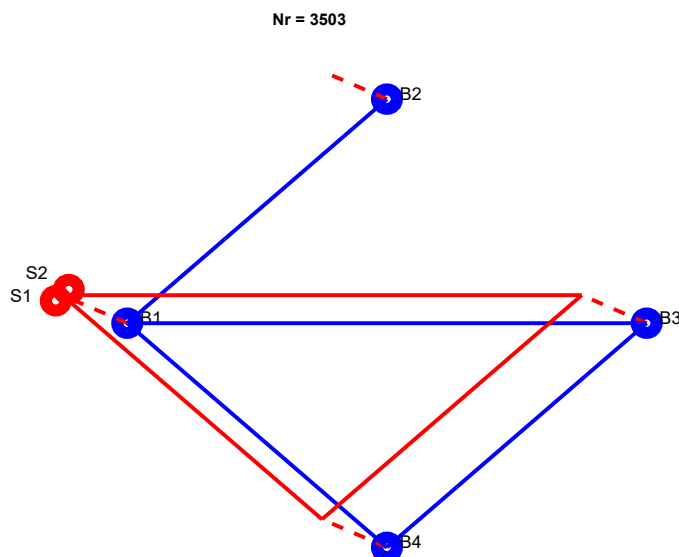


Abbildung 13: Topologie Nr. 3503 – sie dient als Beispiel zur Erläuterung des Datenformats der Datenstruktur

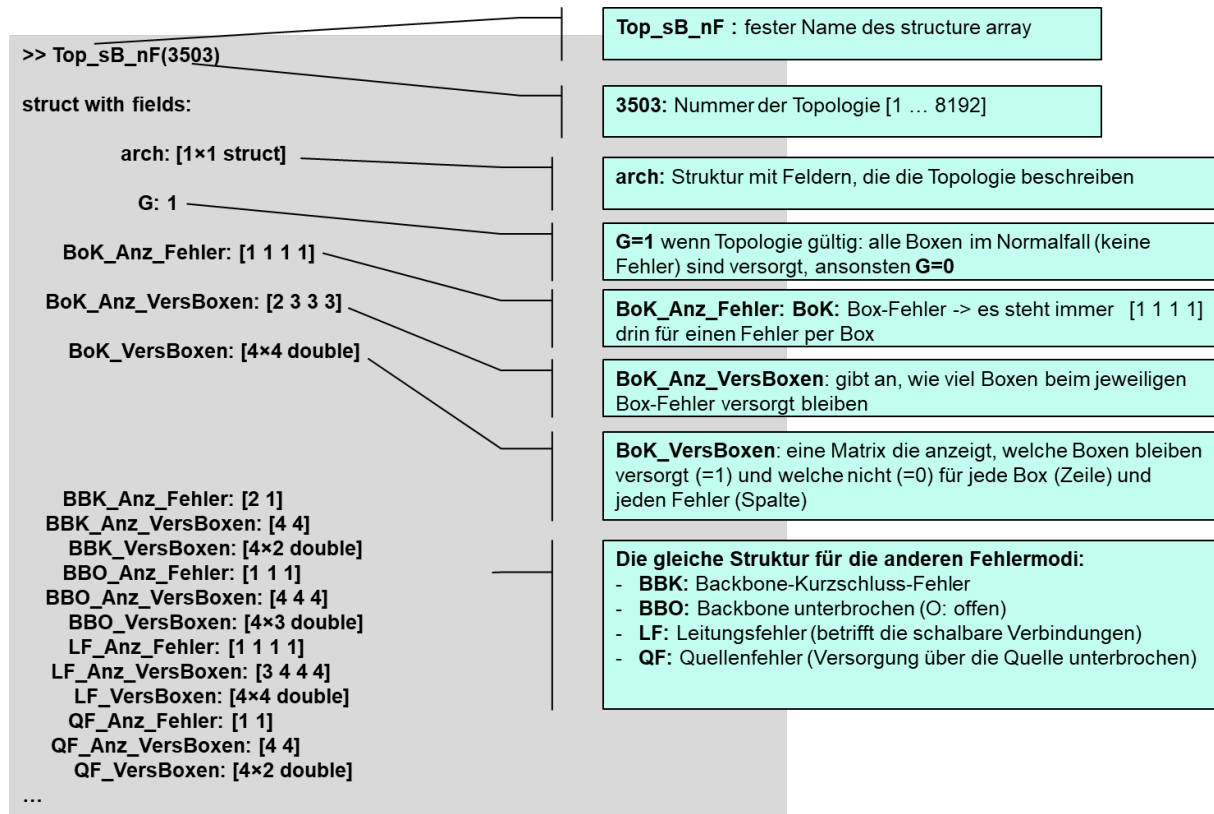


Abbildung 14: Datenstruktur – Topologie Beschreibung und Dokumentation der Auswirkung der Fehlermodi auf die PDU-Versorgung

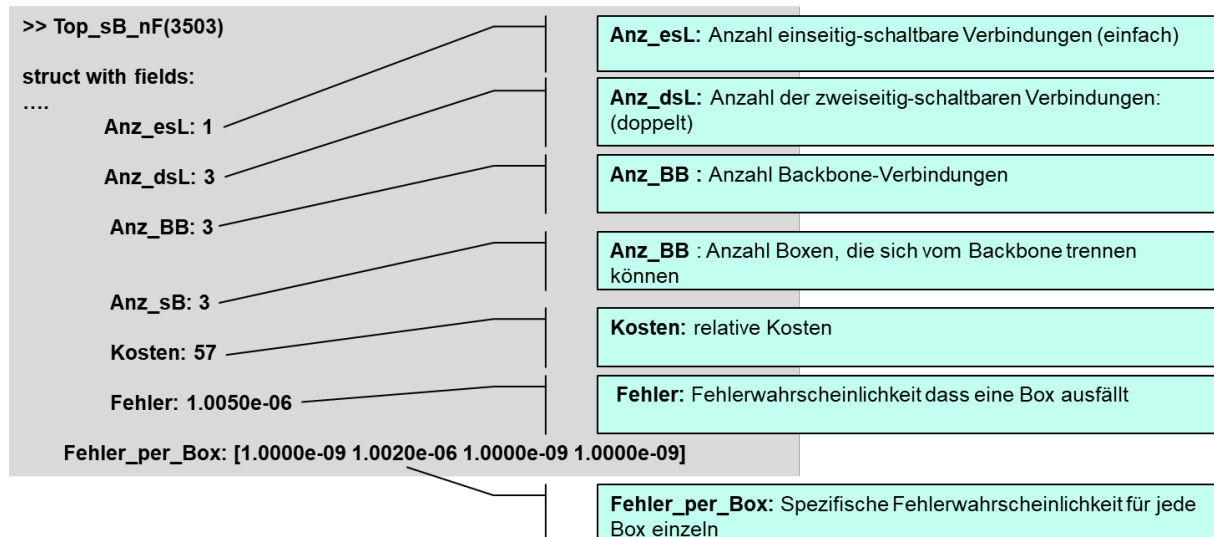


Abbildung 15: Datenstruktur – Dokumentation der berechneten relativen Kosten und der Ausfallwahrscheinlichkeiten jeder PDU

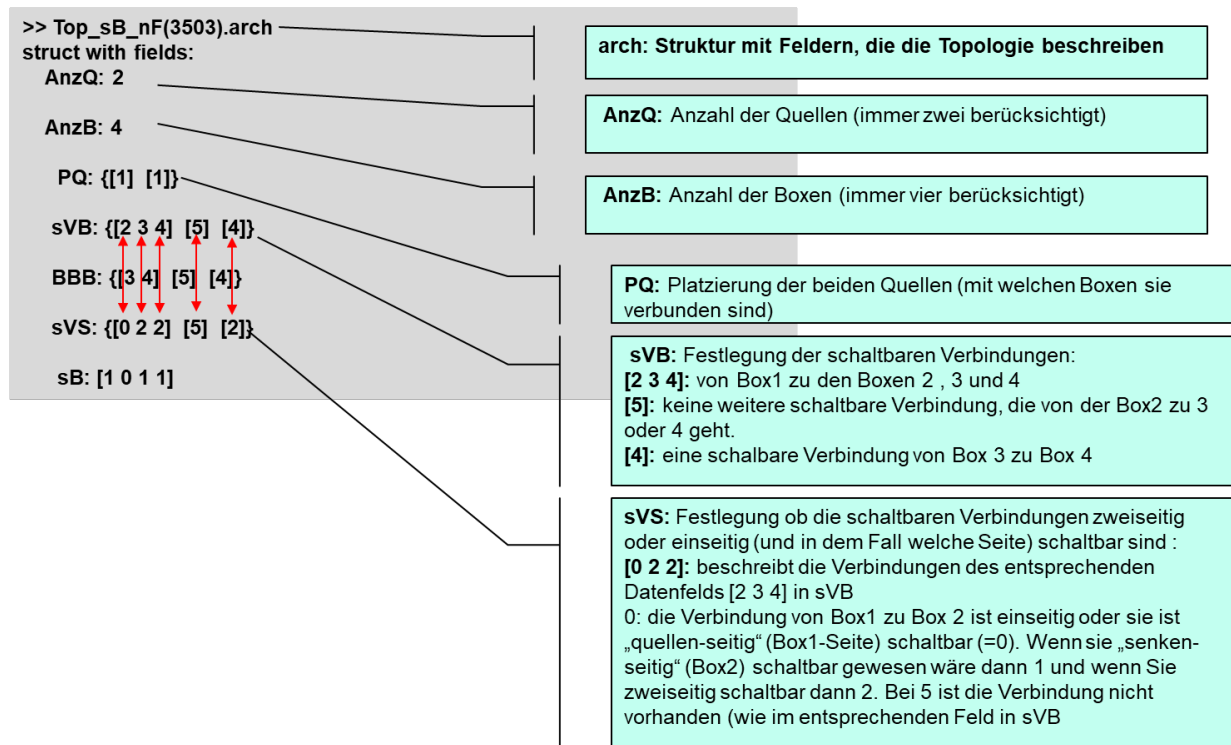


Abbildung 16: Datenstruktur - Dokumentation des algorithmisch abgeleiteten Schaltaufwands bei den schaltbaren Verbindungen

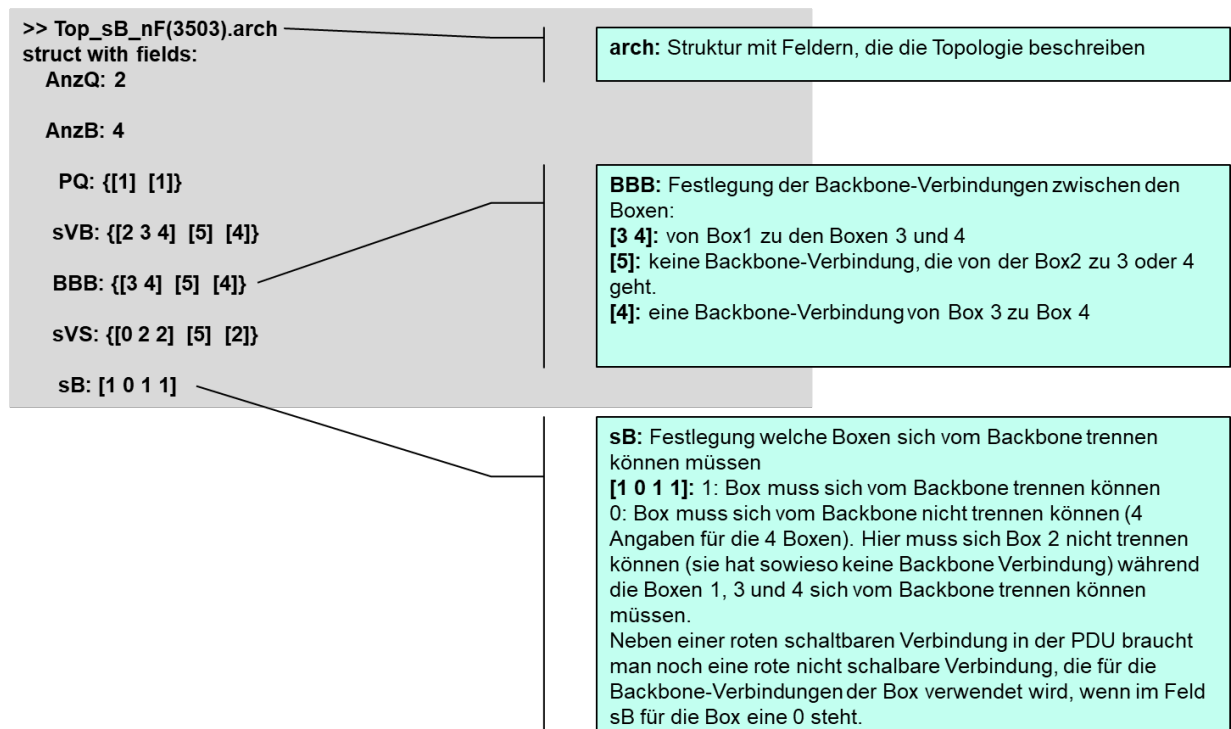


Abbildung 17: Datenstruktur - Dokumentation des algorithmisch abgeleiteten Schaltaufwands bei den Backbone-Verbindungen

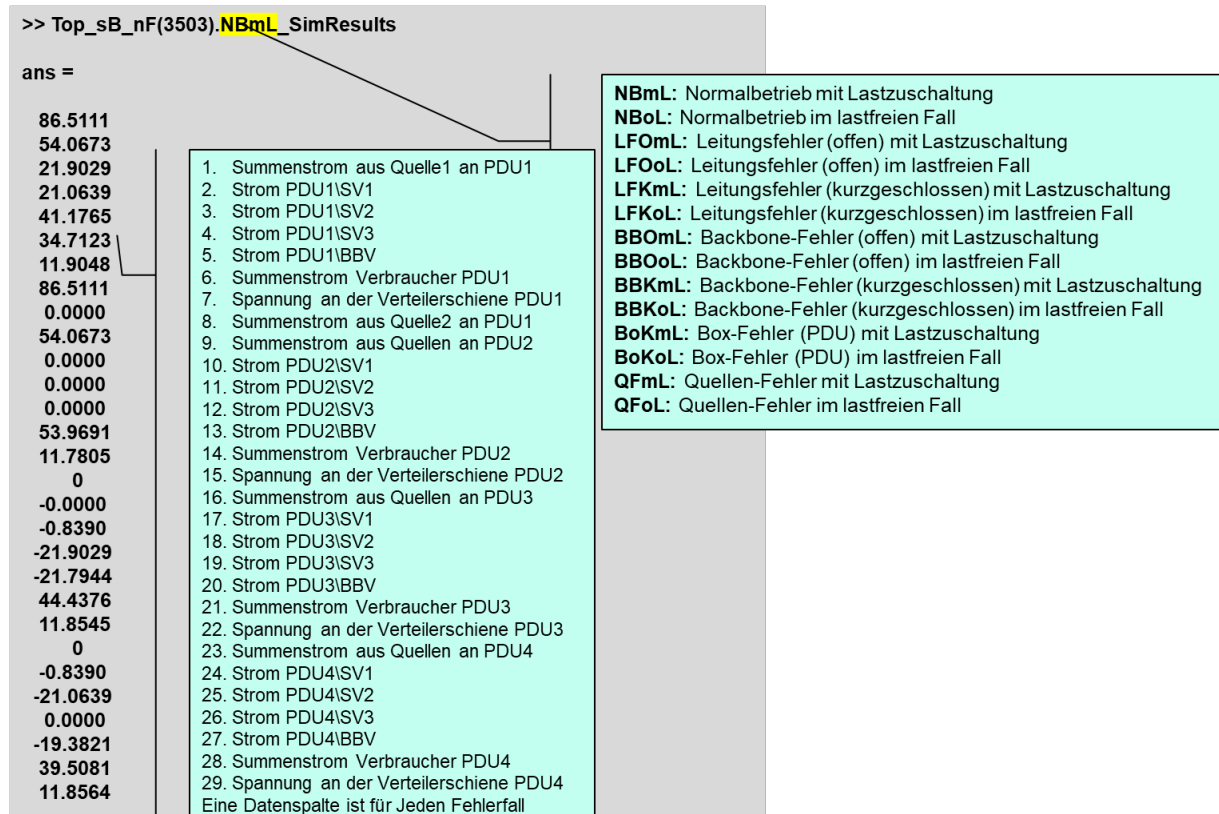


Abbildung 18: Datenstruktur - Dokumentation der Simulationsergebnisse im Normalbetrieb und bei allen betrachteten Fehlerfällen

Die Beschreibung der algorithmisch abgeleiteten Schalthandlungen im Fehlerfall werden anhand der in Abbildung 19 gezeigten Topologie erläutert. Die farblich gekennzeichneten Fehler sind entsprechend mit denselben Farben in den Erklärungen zu den Schalthandlungen zu finden.

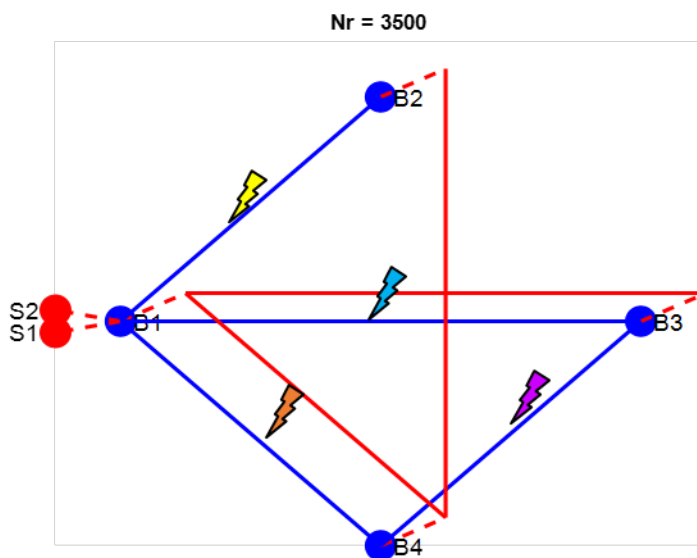


Abbildung 19: Topologie Nr. 3500 – sie dient als Beispiel zur Erläuterung der Beschreibung der Schalthandlungen im Fehlerfall

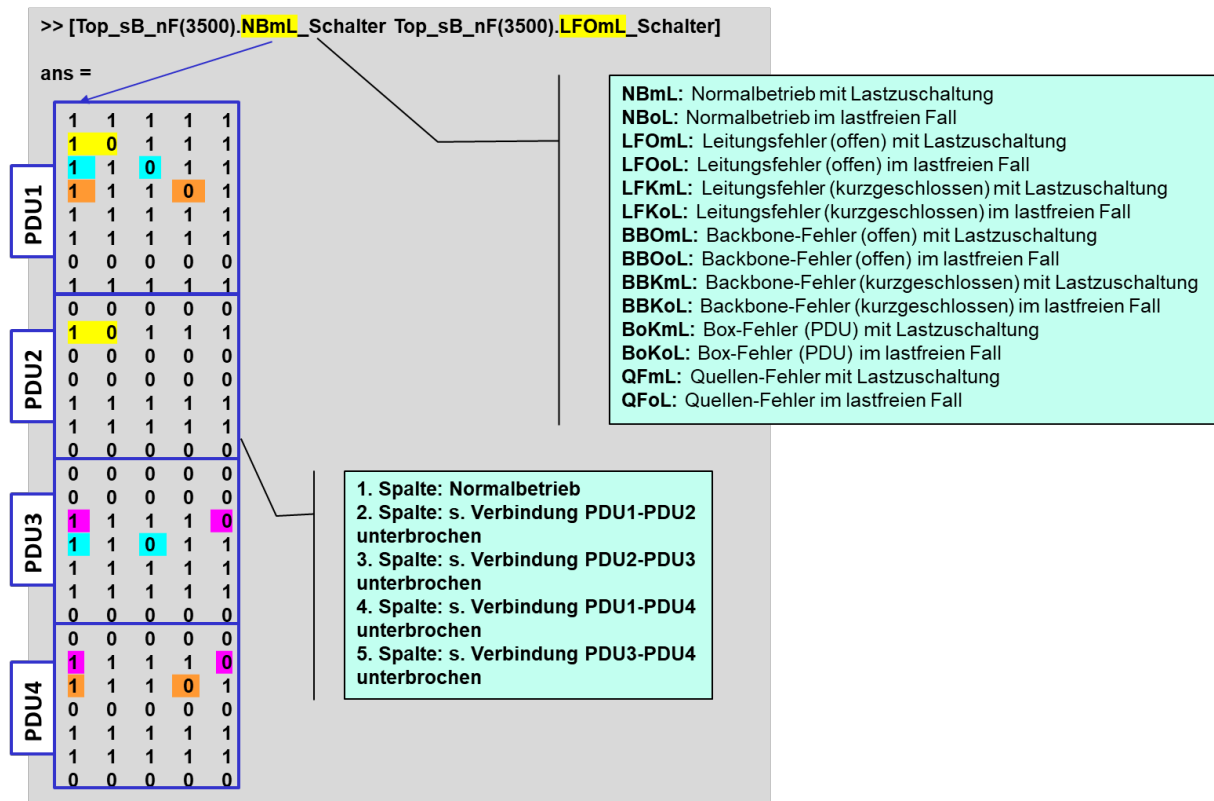


Abbildung 20: Datenstruktur - Dokumentation der algorithmisch abgeleiteten notwendigen Schalthandlungen im Fehlerfall.

Anhand der Topologie Nr. 7 (s. Abbildung 5) werden nun die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen zur lokalen bzw. zentralen Detektierbarkeit in der Datenstruktur in der Abbildung 14 erläutert. Die Untersuchungen basieren wie beschrieben auf der Simulation der Lastfälle bei denen die einzelnen PDUs belastet werden, um die Sensitivitätsfaktoren α_1 bis α_4 abzuleiten.

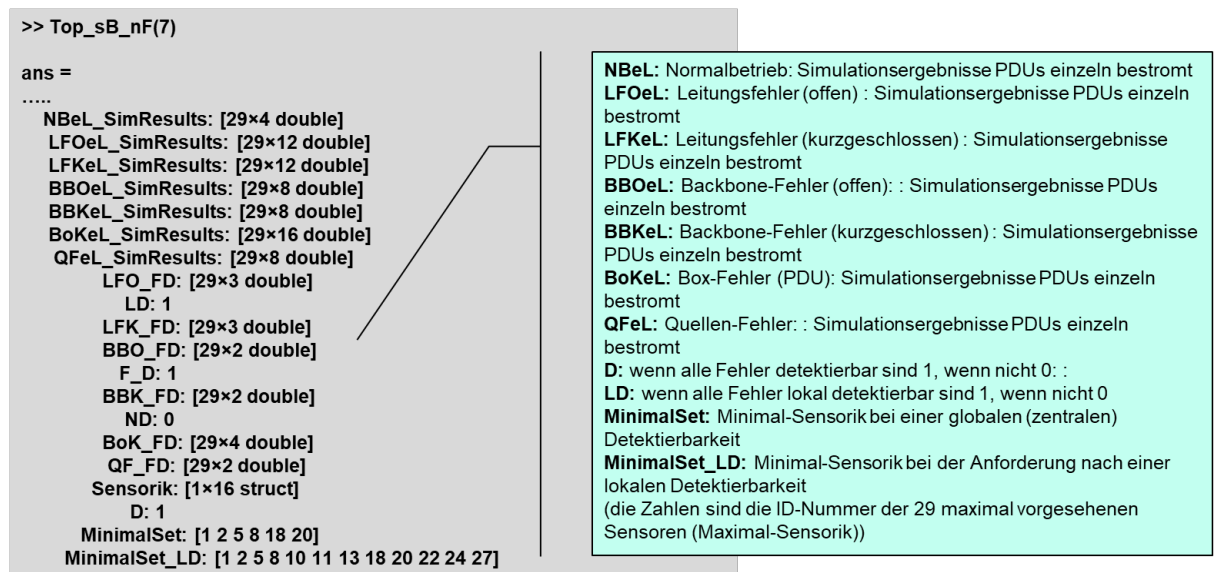


Abbildung 21: Datenstruktur – Dokumentation der Ergebnisse zur lokalen bzw. zentralen Detektierbarkeit der Fehlerfälle

Teil 2

Sensorik im Bordnetz und Datenverarbeitung

Dortmund, den 15.02.2024

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei
M. Sc. Marvin Rübartsch
TU Dortmund
Arbeitsgebiet Bordsysteme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 2 -
2	Diagnose von Eingangsschutzbeschaltungen von Kfz-Steuergeräten	- 3 -
2.1	Angenommene Eingangsschutzbeschaltung für Kfz-Steuergeräte	- 3 -
2.2	Zustandsdefinitionen für die Parameter der Eingangsschutzbeschaltung	- 4 -
2.3	Alterungsmodellierung von Leitungen, Kondensatoren und Dioden.....	- 7 -
2.4	Sensorik des Diagnosekonzeptes	- 9 -
2.5	Energiebordnetz für Anwendungsuntersuchungen	- 10 -
2.6	Modellierung der Sensorik.....	- 11 -
2.7	Diagnosekonzept und Datenvorverarbeitung.....	- 13 -
2.8	Analyse relevanter Eingangsparameter.....	- 14 -
2.9	Ergebnisse der Klassifizierung	- 16 -
2.10	Regression der Parameter	- 19 -
2.11	Analyse der Sensorqualität.....	- 19 -
3	Diagnose von echtzeitkritischen Kfz-Energiebordnetzfehlern.....	- 21 -
3.1	Online-Diagnose von Energiebordnetzfehlern	- 21 -
3.2	Entscheidungsparameter für die Diagnose.....	- 23 -
3.3	Untersuchte neuronale Netzstrukturen	- 25 -
3.4	Anwendung des Konzeptes für Leitungsfehler.....	- 25 -
3.5	Analyse weiterer Energiebordnetzfehler	- 27 -
3.6	Analyse der notwendigen Sensorqualität.....	- 34 -
4	Zusammenfassung	- 36 -
	Literaturverzeichnis	- 38 -
	Abbildungsverzeichnis.....	- 39 -
	Tabellenverzeichnis.....	- 40 -

1 Einleitung

Aufgrund vieler Neuerungen im Bereich der Kraftfahrzeugsysteme, wie zum Beispiel das hochautomatisierte Fahren, rücken ansteigende Sicherheitsanforderungen, und wie man diesen gerecht wird, immer weiter in den Vordergrund. Dies führt unter anderem zu neuen Auslegungen der Energiebordnetzarchitekturen. Bisher eingesetzte Schmelzsicherungen werden durch neuartige Absicherungskonzepte (z.B. elektronische Sicherungen) ersetzt. Die neuen Sicherungen haben dabei die Aufgabe, die Leitungen vor Überlastung zu schützen und die verschiedenen elektrischen Lasten im Energiebordnetz zuverlässig zu versorgen. Elektronische Sicherungen bieten aber auch durch kontinuierliche Strom- und Spannungsmessungen große Potentiale für neuartige Diagnoseverfahren um damit einen sicheren Betrieb des Fahrzeugs zu gewährleisten.

Hier setzen die Arbeiten im Teil 2 des Projektes „Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen“ an. Für die Diagnose zur Erhaltung eines sicheren Fahrbetriebs sind Sensoren im Energiebordnetz des Kraftfahrzeugs notwendig. Diese ermöglichen eine Erfassung des aktuellen Zustands des Gesamtsystems. Da moderne Kraftfahrzeuge bereits eine Vielzahl von Sensoren besitzen, wurde ein Ansatz basierend auf den vorhandenen Sensordaten verfolgt. Der Hauptvorteil besteht vor allem darin, dass die vielen Messungen der vorhandenen Sensorik im Fahrzeug effektiv zur Verbesserung des Gesamtsystemverhaltens genutzt werden können und somit eine erhöhte Sicherheit des Gesamtsystems gewährleistet werden kann. Um eine möglichst realistische Sensorik abzubilden, wurden hierfür Sensormodelle erstellt, um die Qualität der Sensorik zu analysieren und Aussagen zu der Genauigkeit bei verschiedenen Sensoreinflüssen zu analysieren.

Das Arbeitspaket 2 „Sensorik im Bordnetz und Datenverarbeitung“ gliederte sich in zwei wesentliche Themen. Einerseits wurde untersucht, wie sich die Degradierung üblicher Schutzbeschaltungen durch Alterung im Gesamtsystem auswirken. Das Energiebordnetz bietet durch viele Komponenten, sowie einer weitreichenden Verkabelung, viele potentielle Fehlerorte und Fehlermöglichkeiten. Elektronische Steuergeräte im System verfügen daher über eine Eingangsschutzbeschaltung, die das Steuergerät im Idealfall von einem Fehler entkoppelt und außerdem durch genügend Speicherreserven auch einen weiteren Betrieb sicherstellt. Hierfür kommen z.B. Verpolschutzdioden und Kondensatoren zum Einsatz. Allerdings nimmt die Schutzwirkung dieser Maßnahmen aufgrund von Alterungseffekten mit der Zeit ab. Die Kondensatoren sind beispielweise nicht mehr in der Lage so viel Ladung zu speichern, wie sie es am Anfang ihrer Lebenszeit konnten. Hierfür wurde ein datengestütztes Verfahren, das auf Regeln basiert, entwickelt, um die aktuellen Parameter der Eingangsschutzbeschaltung abzuschätzen und anzunähern, sodass ein möglicher Ausfall der Schutzwirkung des Eingangs des Steuergerätes frühzeitig erkannt werden kann. Dieses Verfahren basiert auf künstlicher Intelligenz, die aus den verschiedenen Sensordaten des Fahrzeugs Regeln ableiten kann, um die Parameter des Steuergerätes abzuschätzen.

Andererseits wurde der Fokus im zweiten Teil des Projektes auf die Erkennung von echtzeitkritischen Fehlerfällen gelegt. In Vorgängerprojekten des VDA/FAT AK 30 "Elektrische Energie" [1] wurden bereits verschiedene Fehlermodelle zur Modellierung des Energiebordnetzes im Fehlerfall aufgestellt. Diese Modellbibliothek beinhaltet beispielsweise mögliche Verkabelungsfehler (z.B. Kurzschlüsse oder Leerläufe der Versorgungsleitungen) und Komponentenfehler (z.B. fehlerhafte Regelungen eines verwendeten DC/DC-Wandlers). Mithilfe des im Teil 1 aufgestellten Sensorkonzeptes wurde dann ein echtzeitfähiges datenbasiertes Verfahren zur Fehlererkennung analysiert.

Der Abschlussbericht gliedert sich in zwei Teile. Zunächst wird auf die Erkennung des Alterungszustands von den Eingangsschutzbeschaltungen eingegangen. Hierfür wird das zugrundeliegende Sensorkonzept vorgestellt, sowie die angenommenen Eingangsschutzbeschaltungen als auch die möglichen Parametervariationen aufgrund der Alterung diskutiert. Das vorgestellte Verfahren wird für unterschiedliche Qualitäten der Sensorik analysiert und die Ergebnisse werden dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Betrachtung von echtzeitkritischen Energiebordnetzfehlern. Hierfür wird, basierend auf den Vorarbeiten, das verwendete Sensorkonzept genutzt, um echtzeitkritische Fehler identifizieren, klassifizieren und lokalisieren zu können. Hierfür wurden zwei Konzepte ausgearbeitet: Ein quasikontinuierlicher Ansatz, sowie eine Erweiterung um einen kontinuierlichen Ansatz. Die Datenaufnahme und Aufbereitung der Daten werden dargestellt und die Anwendung des Modells zur Fehlererkennung wird analysiert. Auch hierfür werden die Sensormodelle verwendet, um den Einfluss der Sensorqualität zu analysieren. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse wird am Ende des Berichts gegeben.

2 Diagnose von Eingangsschutzbeschaltungen von Kfz-Steuergeräten

Im folgenden Kapitel wird auf die Analyse der Alterung der Eingangsschutzbeschaltungen eingegangen. Zunächst werden übliche Eingangsschutzbeschaltungen diskutiert und die Auswirkungen der Alterungsvorgänge auf die Parameter des Eingangsschutzes dargestellt. Ein Sensorkonzept, das die Basis der Diagnosekonzepte bildet, für moderne Energiebordnetze wird vorgestellt. Danach werden simulationsbasiert Trainings- und Testdaten für die KI-basierten Verfahren über diese Parameterräume generiert und die Modelle werden trainiert. Anschließend folgt eine Analyse der Sensorqualität auf die Diagnosefähigkeit. Hierfür wurden im Rahmen des Projektes Sensormodelle entwickelt, die verschiedene Effekte realer Sensorik nachbilden können.

2.1 Angenommene Eingangsschutzbeschaltung für Kfz-Steuergeräte

Steuergeräte im Fahrzeug sind häufig über Eingangsschutzbeschaltungen im Falle eines Fehlers abgesichert. Häufig werden Stabilisierungskondensatoren und Verpolschutzschaltungen verwendet [2]. Die Eingangskondensatoren dienen der Spannungsstabilisierung und dem Schutz gegen Bordnetzpulsen sowie EMV-Störungen. Verpolschutzschaltungen werden genutzt, um einerseits Schäden durch falsche Polung der Batterie zu verhindern und andererseits auch das Steuergerät vom Rest des Bordnetzes, z.B. im Falle eines Kurzschlusses, zu entkoppeln. Die Funktion dieser Schaltungen wird heute bisher nicht überwacht.

Ein Problem hierbei ist, dass die Eingangsschutzbeschaltung von Steuergeräten häufig nicht bekannt ist, und es verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung des Eingangsschutzes gibt. In den meisten Fällen handelt es sich also um Blackbox-Systeme, die betrachtet werden. Im Rahmen dieses Projektes musste daher zunächst eine Eingangsschutzbeschaltung definiert werden, die im weiteren Verlauf der Arbeiten analysiert wird. Diese Eingangsschutzbeschaltung ist in Abbildung 1 dargestellt.

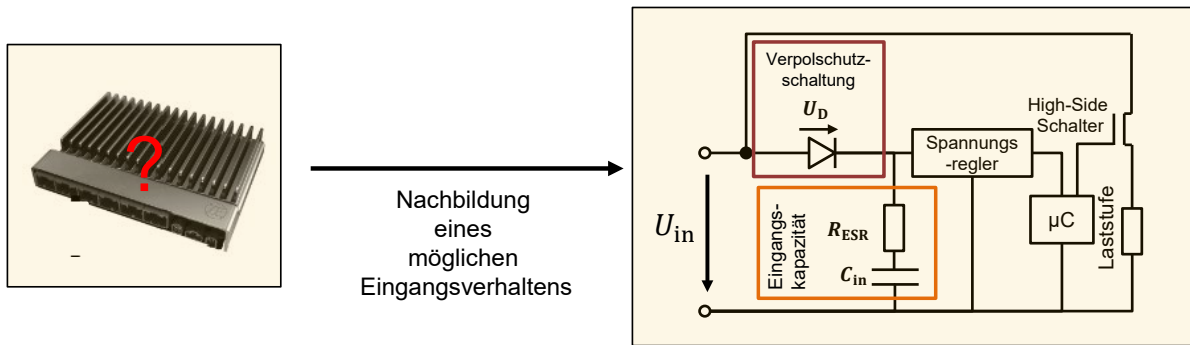


Abbildung 1: Definition einer realistischen Eingangsbeschaltung für unbekannte Kfz-Steuergeräte

Hierfür wurde zunächst ein Verpolschutz in Form einer Verpolschutzdiode angenommen [3]. Nach der Verpolschutzdiode befindet sich direkt die spannungsstabilisierende Kapazität. In der Regel verwenden Steuergeräte Mikrocontroller, um Sensoren und Aktoren anzusteuern. Hierfür wird häufig eine niedrigere Spannung (z.B. 5 V oder 3,3 V) zur Versorgung der Steuerelektronik verwendet. Dies kann beispielsweise durch einen DC/DC-Wandler oder auch durch einen Linearregler geschehen. In diesem Fall wurde eine allgemeine Spannungsregelung festgehalten. Der Mikrocontroller kann dann die Steuersignale für die Laststufe geben. Hierfür wurde ein High-Side-Schalter zur Versorgung der Aktorik angenommen. Bei der Diagnose liegt der Fokus vor allem auf die Verpolschutzschaltung, sowie der Eingangskapazität. Über die Diode fällt eine Spannung U_D ab, die vom Alterungszustand abhängt. Für Kapazitäten ist es häufig ausreichend den Ersatzserienwiderstand R_{ESR} , sowie den tatsächlichen Kapazitätswert C_{in} zu betrachten. Diese Parameter sind auch stark abhängig vom Alterungszustand, sodass am Ende drei wichtige Parameter zur Diagnose der Eingangsschutzbeschaltung betrachtet werden müssen: U_D , R_{ESR} , C_{in} .

2.2 Zustandsdefinitionen für die Parameter der Eingangsschutzbeschaltung

Im vorherigen Kapitel wurde bereits auf die wichtigen Komponenten des Eingangsschutzes zur Diagnose eingegangen. Nun gilt es, deren tatsächliche Parameter zu klassifizieren. Hierfür wurden verschiedene Literaturquellen analysiert und verschiedene Definitionen für das Ende der Lebensdauer der Komponenten aufgestellt.

Als spannungsstabilisierende Kapazität werden häufig Aluminium-Elektrolytkondensatoren verwendet. Der Vorteil ist hierbei die hohe Kapazität und ein geringes Volumen. Für Kapazitäten wird das Ende der Lebensdauer in der Literatur häufig anhand der Parameter des aktuellen äquivalenten Serienwiderstands $R_{ESR}(t)$ sowie des aktuellen Kapazitätswertes $C_{in}(t)$ definiert [4]:

$$C_{in}(t) \leq 0,8 \cdot C_{in,0}$$

$$R_{ESR}(t) \geq 2 \cdot R_{ESR,0}$$

Hierbei wird das Ende der Lebensdauer einer Kapazität anhand der initialen Parameter bestimmt. Wenn die Kapazität neu ist, besitzt sie die Parameter $C_{in,0}$ und $R_{ESR,0}$. Mit der Alterung nimmt der Wert des äquivalenten Serienwiderstands zu [5]. Wenn dieser Parameter doppelt so groß wird, wie der ursprüngliche Wert, wäre eines der zwei Kriterien verletzt und das Ende der Lebensdauer wäre nach dieser Definition erreicht. Der tatsächliche Kapazitätswert nimmt in der Regel mit der Alterung ab [5]. Wenn der tatsächliche Kapazitätswert um mehr als 20 % vom ursprünglichen Wert abweicht, wird vom Ende der Lebensdauer gesprochen. Das heißt,

dass die Kapazität nur noch 80 % der ursprünglichen Ladung speichern kann. Diese Definition kann nun zu verschiedenen Klassifikationsbereichen für die Betrachtung der Alterung führen. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt.

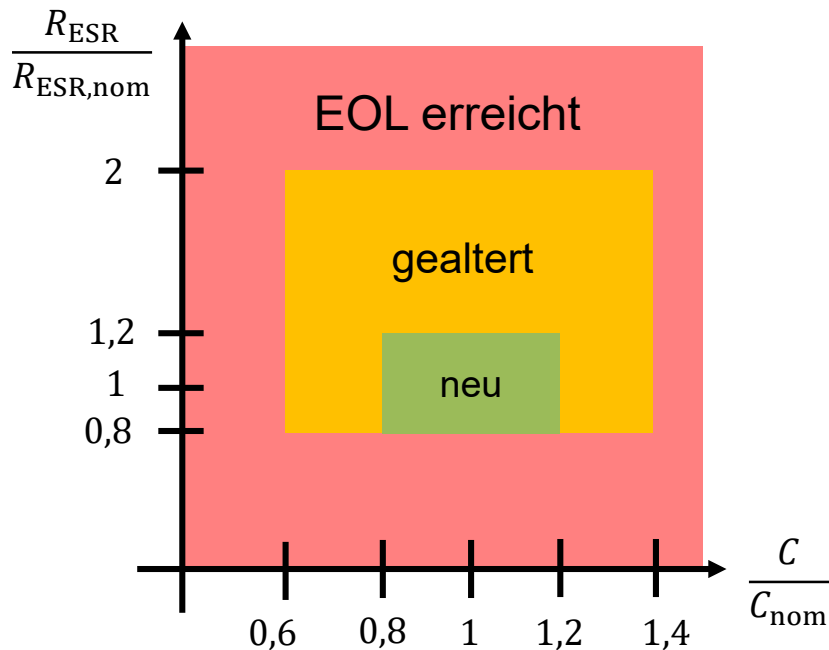


Abbildung 2: Definition der Lebensdauerbereiche der spannungsstabilisierenden Eingangskapazität

Bei der Auswahl einer Kapazität würde man zunächst eine nominale Kapazität für die Spannungsstabilisierung auswählen. Der tatsächliche Initialwert dieser Kapazität kann aufgrund von Fertigungstoleranzen von dem Wert aus dem Datenblatt abweichen. Typische Werte hierfür sind $\pm 20\%$. Dadurch ergeben sich die Toleranzbereiche für den Zustand der neuen Kapazität (grün). Bei einer Abweichung über die 20 % Toleranzgrenzen hinaus (gelb), kann von einer gealterten Kapazität gesprochen werden. Ist eines der vorher genannten Kriterien verletzt, ist das Ende der Lebenszeit (engl. **End of Life**, Abk. EOL) erreicht (rot).

Für Optimierungen und Analysen der Genauigkeit der verwendeten trainierten Modelle wurde diese Unterscheidung von drei Klassen auf zwei Klassen reduziert, sodass nur noch eine Unterscheidung zwischen „i.O.“ (in Ordnung) und „n.i.O.“ (nicht in Ordnung) durchgeführt wurde. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt. Dies hatte vor allem den Vorteil, dass die trainierten Modelle noch einfacher nachzuvollziehen waren und eine einfache Optimierung durchgeführt werden konnte.

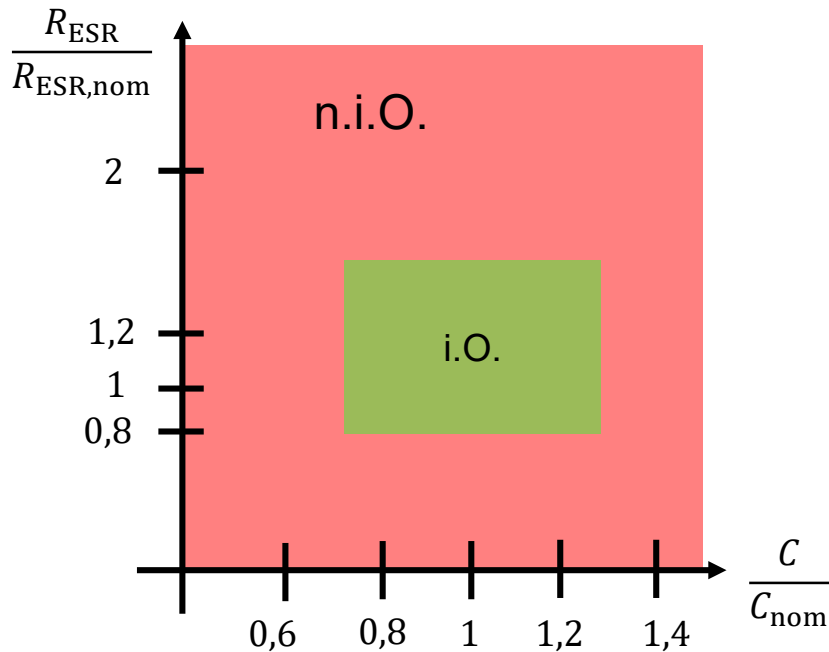


Abbildung 3: Definition der Lebensdauerbereiche der spannungsstabilisierenden Eingangskapazität

Für die Diagnose der Diode ist vor allem die Vorwärtsspannung der Diode interessant. Durch Alterung der Komponente nimmt diese in der Regel zu. Für die Analyse der Alterungsauswirkungen wurden in [6] etwa 330.000 Dioden untersucht. Auf Basis der Untersuchungen konnten auch hier Definitionen für die verschiedenen Alterungsbereiche aufgestellt werden. Abbildung 4 zeigt einen erarbeiteten Vorschlag zur Klassifizierung der Parameterbereiche der Verpolschutzdiode.

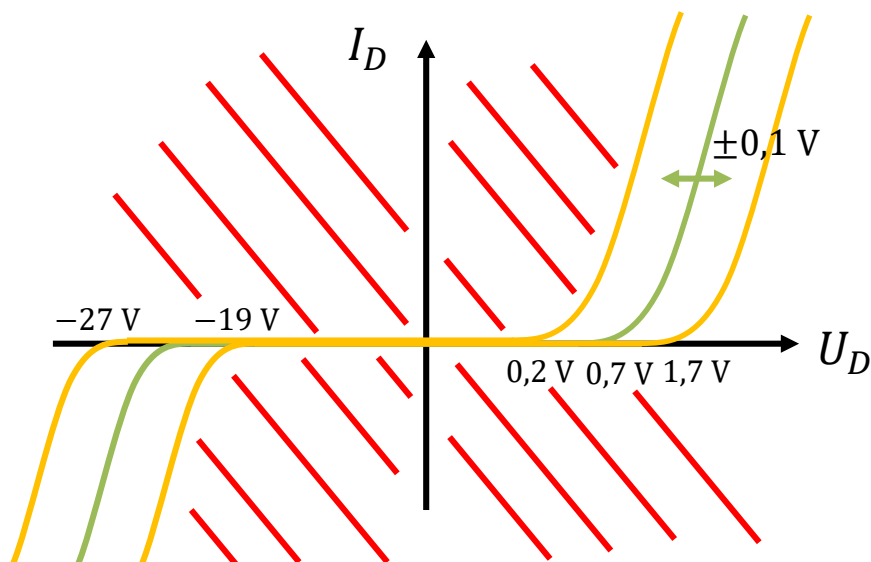


Abbildung 4: Definition der Lebensdauerbereiche der Verpolschutzdiode

Dargestellt sind hier übliche Diodenkennlinien. Abhängig von der Diodenspannung U_D stellt sich in an der Diode ein Strom I_D ein. Oft wird eine nominale Diodenspannung von 0,7 V in Vorwärtsrichtung angenommen. Erst ab dieser Spannung kann ein Strom durch die Diode fließen. Um Fertigungstoleranzen zu berücksichtigen, wird hier eine Toleranz von $\pm 0,1$ V definiert, um die Diode als neu zu klassifizieren (grün). Aus den Experimenten in [6] konnten weitere Grenzen abgeleitet werden für gealterte, aber noch funktionierende Dioden. Diese sind

hier in Gelb dargestellt. Wenn eine Diode zwischen 0,2 V und 1,7 V Vorwärtsspannung aufweist, wird eine gealterte Diode angenommen. Sobald die Vorwärtsspannung der Diode noch weiter ab- oder zunehmen sollte, ist das Ende der Lebenszeit (rot) erreicht. Für die Rückwärtsrichtung werden Dioden im Kfz-Bereich häufig mit Durchbruchspannungen zwischen -19 V und -27 V verwendet. Dioden, die noch kleinere oder größere Durchbruchspannungen aufweisen, werden hierbei auch dem Ende der Lebensdauer zugeordnet.

Die aufgestellten Diagnosekonzepte in diesem Projekt haben sich zunächst hauptsächlich mit der Analyse der spannungsstabilisierenden Kapazität beschäftigt, da Aluminium-Elektrolytkondensatoren häufig die geringste Lebensdauer unter aktiven und passiven Bauelementen besitzen [7] und somit dominant für Ausfälle verantwortlich sind. Die erarbeiteten Konzepte sind anhand der Definition der Lebensdauerbereiche für Verpolschutzdioden aber auch auf Verpolschutzschaltungen anwendbar. Im Folgenden wird der Fokus auf die Diagnose der Eingangskapazität von Steuergeräten gesetzt.

2.3 Alterungsmodellierung von Leitungen, Kondensatoren und Dioden

Im Rahmen des Projektes wurden Alterungsmodelle für Leitungen und Kondensatoren aufgestellt. Mithilfe dieser Alterungsmodelle ist es möglich, starke Belastungen der Komponenten zu simulieren und Fehlerfälle anhand dieser Modelle zu aktivieren, wenn die Alterung weit genug fortgeschritten ist.

Fehlerbilder bei Leitungen werden primär nicht durch Alterung oder zufällige Ausfälle verursacht [8]. Allerdings können beschädigte Isolierungen zu Kurzschlüssen führen. Deshalb wurde mithilfe der Arrhenius-Gleichung ein Modell zur Beschreibung der Isolationsalterung eines Kabels aufgestellt. Die Lebensdauer (LD) einer Komponente lässt sich nach Arrhenius nach der folgenden Gleichung abschätzen:

$$LD = \frac{1}{A} \cdot e^{\frac{b}{T}}$$

Hierbei beschreiben A und b Konstanten, die sich aus dem Datenblatt einer Leitung ableiten lassen. Beispielhaft wird für eine Leitung eine Lebensdauer von 3000 h bei 105 °C angegeben. Die Lebensdauer reduziert sich auf 6 h, wenn die Leitung bei 155 °C belastet wird. Für die ausgewählte Leitung würden sich die folgenden Parameter ergeben:

$$A \cong 4,31 \cdot 10^{19}$$

$$b \cong 20123,5$$

Nach Bestimmung der Parameter kann anhand eines Belastungsprofils in Form eines Temperaturverlaufs über der Zeit der verbleibende **State of Health (SoH)** bestimmt werden:

$$SoH = 100\% \cdot \left(1 - \int A e^{\left(-\frac{b}{T(t)}\right)} dt \right)$$

Durch Umstellung der Gleichung und Integration über die Belastung lässt sich der aktuelle Alterungszustand der Isolation angeben. Eine Berechnung für diese Parameter und konstanter Temperaturbelastung wurde durchgeführt und ist in Abbildung 5 zu sehen.

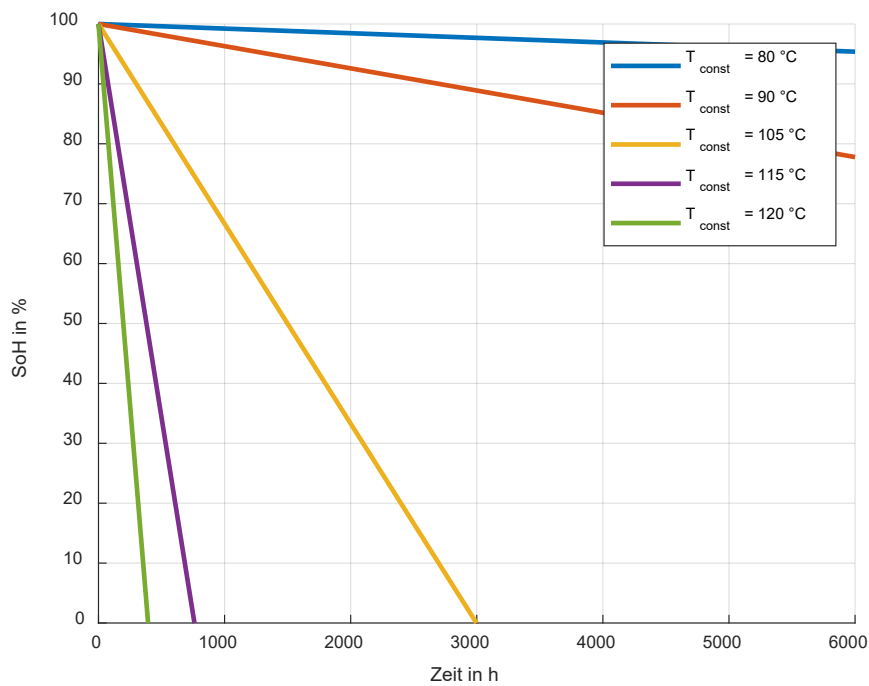


Abbildung 5: State of Health einer Leitung bei Belastung mit konstanter Temperatur

Es wird deutlich, wie sich der Zustand der Leitung bei konstanter Temperatur verhält. Das Modell wurde außerdem für variable Temperaturprofile getestet. Dies ist in Abbildung 6 dargestellt.

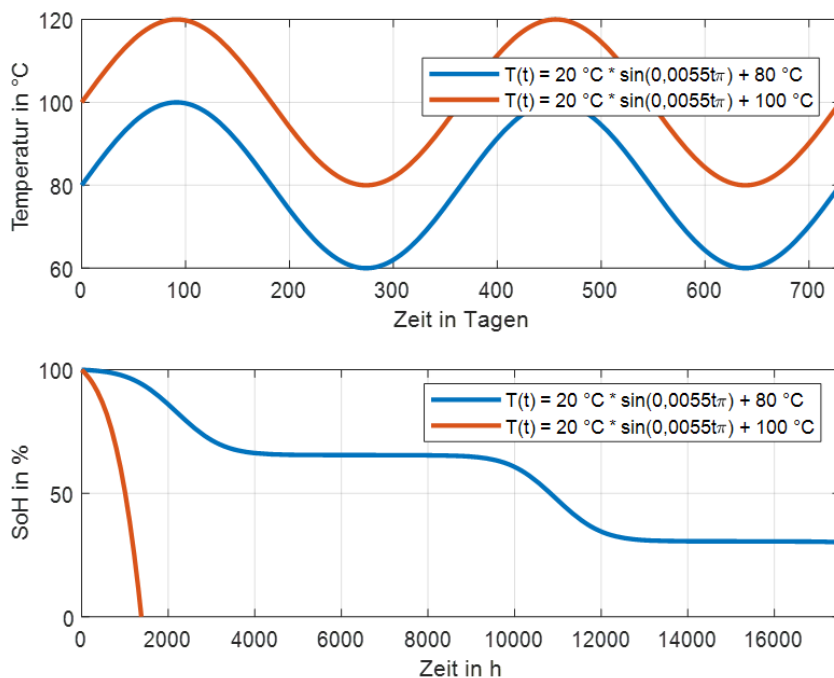


Abbildung 6: State of Health einer Leitung bei Belastung mit zeitlich veränderlichem Temperaturprofil

Zu sehen sind die angenommenen variablen Temperaturprofile. Hier wurde eine stark vereinfachte Auswertung über das Jahr vorgenommen, bei dem die Temperatur über das Jahr um

einen konstanten Wert schwankt. Es wurde von einem Hoch im Sommer und einem Tief im Winter ausgegangen und mit einem Sinus-Verlauf modelliert. Somit ist das Modell auch für variable Belastungsvorgänge geeignet.

Die Arrhenius-Gleichung kann weiterhin auch für Kapazitäten und Dioden angewendet werden. Hierfür können die Parameter zur Modellierung auch aus dem Datenblatt entnommen werden. Bei einer Kapazität wird häufig allerdings nur eine Lebensdauer angegeben. Beispielsweise könnte eine Lebensdauer von einer realen Kapazität mit 6000 h bei 105 °C angegeben sein. Bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 °C wird die Lebensdauer um die Hälfte reduziert. Daher kann nach den Datenblattangaben die zweite Bedingung zur Bestimmung der Parameter angenommen werden zu 3000 h bei 115 °C. Analog kann für Dioden über die Arrhenius-Gleichung eine Abschätzung der Lebensdauer vorgenommen werden.

2.4 Sensorik des Diagnosekonzeptes

Wie in der Einleitung erwähnt, gibt es im Kraftfahrzeug bereits viele verschiedene Sensoren, die prinzipiell zur Diagnose genutzt werden können. In diesem Projekt wurde sich auf eine Minimalkonfiguration zur Diagnose beschränkt, um eine zentralisierte Diagnose in einer Energieverteilereinheit zu ermöglichen und gezielt die nötige Sensorqualität zu untersuchen.

Die heutzutage üblich eingesetzten Schmelzsicherungen werden in neuen Energiebordnetzen zunehmend durch elektronische Sicherungen ersetzt, da diese eine höhere Flexibilität in der Programmierung, sowie eine Reduktion von Kabelquerschnitten ermöglichen. Die Sicherungen müssen zum Leitungsschutz den Strom durch die Leitung messen und im Fehlerfall die Leitung vor einer Überlast schützen. Diese bereits, für jede einzelne elektronische Sicherung, vorhandene Messtechnik wurde in diesem Projekt genutzt. Abbildung 7 zeigt die verwendete Sensorik in der Energieverteilereinheit.

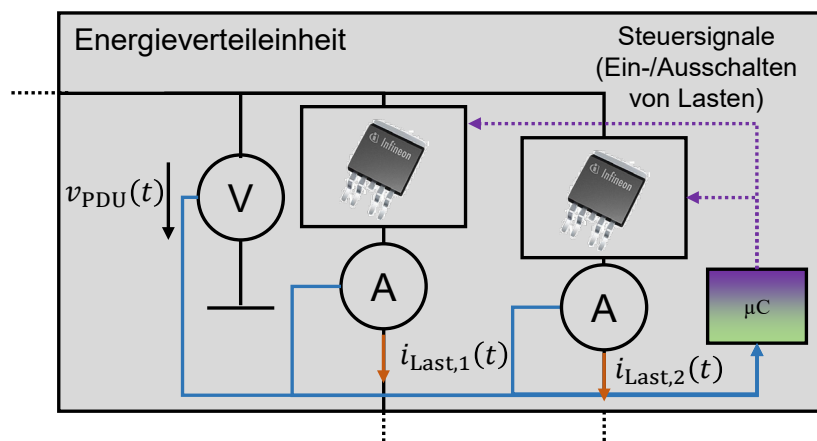


Abbildung 7: Verwendete Sensorik in einer Energieverteilereinheit

Die hier betrachtete Energieverteilereinheit (engl. **P**ower **D**istribution **U**nit, kurz: PDU) kann analog zu einer Sicherungsbox für Schmelzsicherungen verstanden werden. Links würde die 14 V Bordnetzspannung anliegen. Die elektronischen Sicherungen versorgen in diesem Beispiel zwei Lasten. Ein Mikrocontroller übernimmt hierbei die Ansteuerung der Sicherungen und kann Lasten wahlweise Ein- oder Ausschalten.

Die Sensorik besteht in diesem Fall aus einer Spannungsmessung innerhalb der Energieverteilereinheit, sowie den Strommessungen, die zu den Verbrauchern im Energiebordnetz über die Leitungen führen (orange). Die Spannungsmessung kann in einer Energieverteilereinheit genutzt werden, um mögliche Unter- und Überspannungen am Eingang zu detektieren. Die

Ströme werden durch die elektronischen Sicherungen zum Leitungsschutz ausgewertet. Diese Messungen bilden die Basis für das erarbeitete datenbasierte Diagnosekonzept.

Für eine Offline-Diagnose wäre es möglich, die Parameter der Eingangsschutzbeschaltung über verschiedene Charakterisierungsmessungen zu bestimmen. Hierbei könnten beispielsweise Sprungantworten gemessen oder Sinussignale für die Charakterisierung für verschiedene Frequenzen genutzt werden. Für die untersuchte Online-Diagnose werden Schaltmuster im Energiebordnetz ausgenutzt. Die elektronischen Sicherungen können flexibel die Lasten Ein- und Ausschalten, sodass das gezielte Einschalten einer Last verwendet werden kann um die Charakterisierung der Eingangsschutzbeschaltung durchzuführen.

2.5 Energiebordnetz für Anwendungsuntersuchungen

Für die Untersuchungen des erarbeiteten Konzeptes wurde ein Energiebordnetz mit zwei Lasten untersucht und in der Simulationsumgebung Matlab Simulink/Simscape nachgebildet. Hierbei stellt eine der Lasten die zu diagnostizierende Last dar und die zweite Last eine Ersatzlast und steht für weitere Energiebordnetzverbraucher. Das untersuchte Energiebordnetz ist in Abbildung 8 dargestellt.

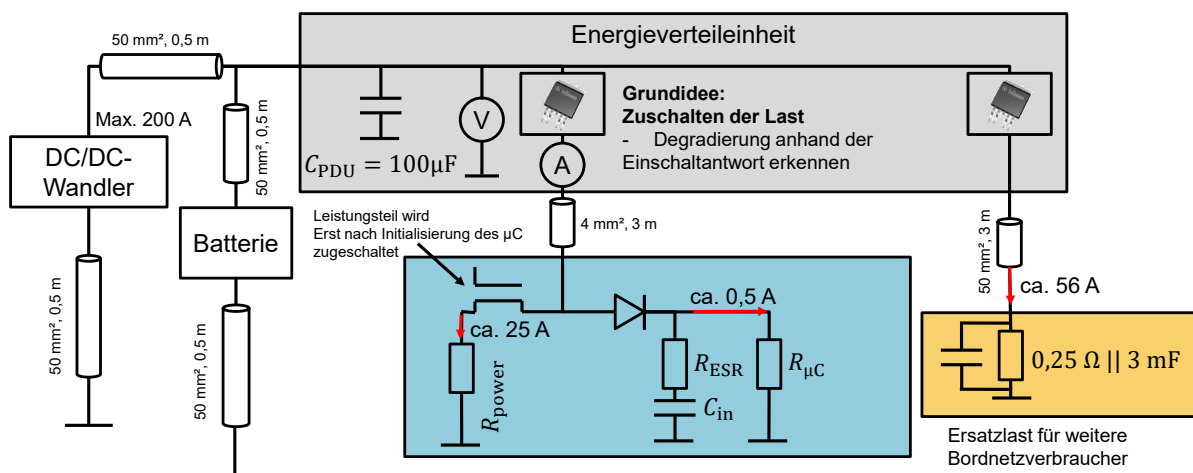


Abbildung 8: Untersuchtes Beispielbordnetz

Die Energieversorgung des Bordnetzes wird durch einen DC/DC-Wandler, sowie mit einer Batterie sichergestellt. Der DC/DC-Wandler ist dabei in der Lage, einen maximalen Strom von 200 A zu liefern. In der Energieverteilereinheit befindet sich in diesem Fall eine Kapazität von 100 μF , die zur Stabilisierung der Steuerelektronik für die elektronischen Sicherungen benötigt wird. Die in blau dargestellte Last soll diagnostiziert werden. Der Leistungsteil des Steuergerätes ist auf der linken Seite dargestellt. Auf der rechten Seite, innerhalb des blauen Verbrauchers, ist der Verpolschutz in Form einer Diode, sowie die Eingangskapazität zu sehen. Die nominale Kapazität beträgt in diesem Fall $C_{in,nom} = 400 \mu F$ und der Ersatzserienwiderstand kann mit $R_{ESR,nom} = 60 m\Omega$ angegeben werden. Der Spannungsregler und Mikrocontroller aus Abbildung 1 wird in der Simulation zu einem Widerstand zusammengefasst. Dieser Widerstand bildet eine Stromaufnahme von 0,5 A bei 14 V ab. Der Leistungsteil soll in diesem Falle eine Stromaufnahme von 25 A besitzen. Die rechts dargestellte Last (gelb) stellt weitere zusammengefasste Verbraucher des Energiebordnetzes dar. Sie hat in diesem Bordnetz eine Stromaufnahme von etwa 56 A. Die Eingangskapazitäten mehrerer paralleler, weiterer Steuergeräte im Energiebordnetz werden hier mit einer Gesamtkapazität von 3 mF nachgebildet. Die Dimensionierung der Leitungen erfolgte anhand der Verbraucherströme nach der ISO 8820-3.

Die verwendeten Modelle basieren auf vorangegangenen Untersuchungen und sind in [1] und [9] beschrieben.

Die Sensorik der Sicherung der Ersatzlast kann in diesem Fall vernachlässigt werden, da der Fokus auf die Diagnose der blau diagnostizierten Last liegt. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, werden zur Charakterisierung Schaltmuster im Energiebordnetz verwendet. In diesem Fall wird die Last charakterisiert, wenn Sie eingeschaltet wird. Die Auswirkung der diskutierten Parametervariationen der Eingangskapazität, die in Kapitel 2.2 dargestellt wurden, können in Abbildung 9 gesehen werden.

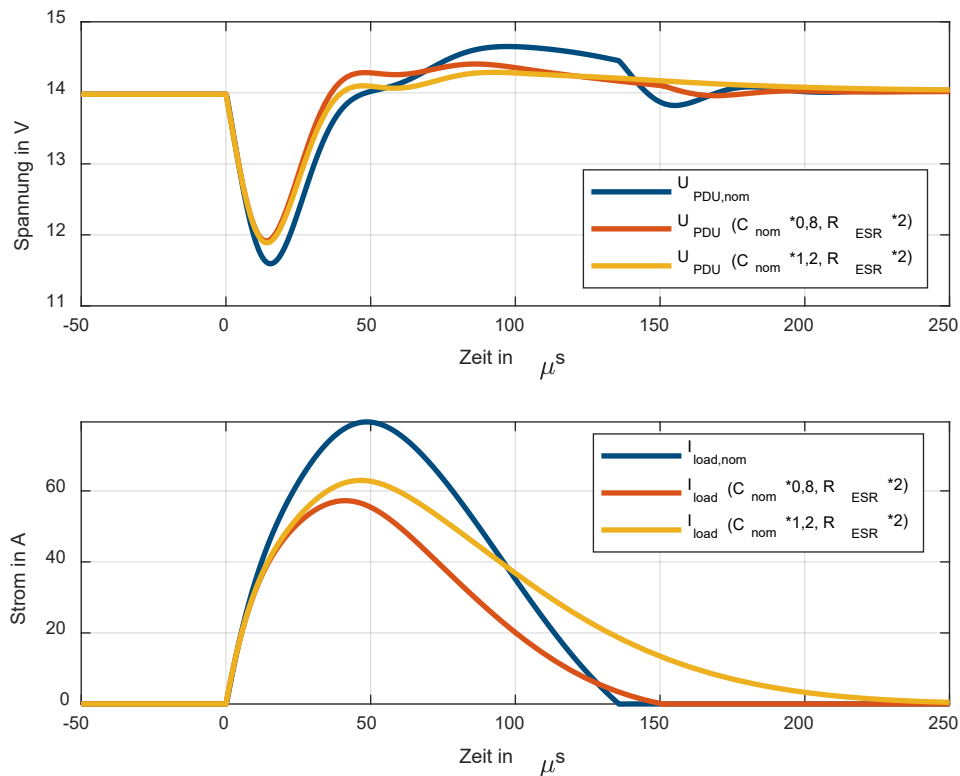


Abbildung 9: Auswertung der verschiedenen Alterungszustände der Eingangskapazität

Zu sehen ist hier die gemessene Spannung, sowie der gemessene Strom in der Energieverteilereinheit. Vor allem im Einschaltstrom des Verbrauchers können die verschiedenen Parameterkombinationen, die verschiedenen Alterungszuständen entsprechen, klar erkannt werden. Auch in der gemessenen Spannung sind unterschiedliche Verläufe zu beobachten. Zu sehen ist außerdem, dass die maximalen Einschaltzeiten nur etwa $250 \mu s$ betragen. Daher kann der Leistungsteil des Verbrauchers vernachlässigt werden, da die meisten Mikrocontroller zunächst einige Millisekunden zur Initialisierung benötigen bevor der Leistungsteil zugeschaltet werden kann.

2.6 Modellierung der Sensorik

Um die Auswirkung der Sensorqualität zu untersuchen, wurden Sensormodelle implementiert. Diese manipulieren die zunächst ideal simulierten Daten nach den Simulationen. Die Manipulation der Daten wird hierbei direkt in Matlab codebasiert durchgeführt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für die Manipulation der Sample-Rate der Sensorik bei Aufnahme der Spannung in der Energieverteilereinheit.

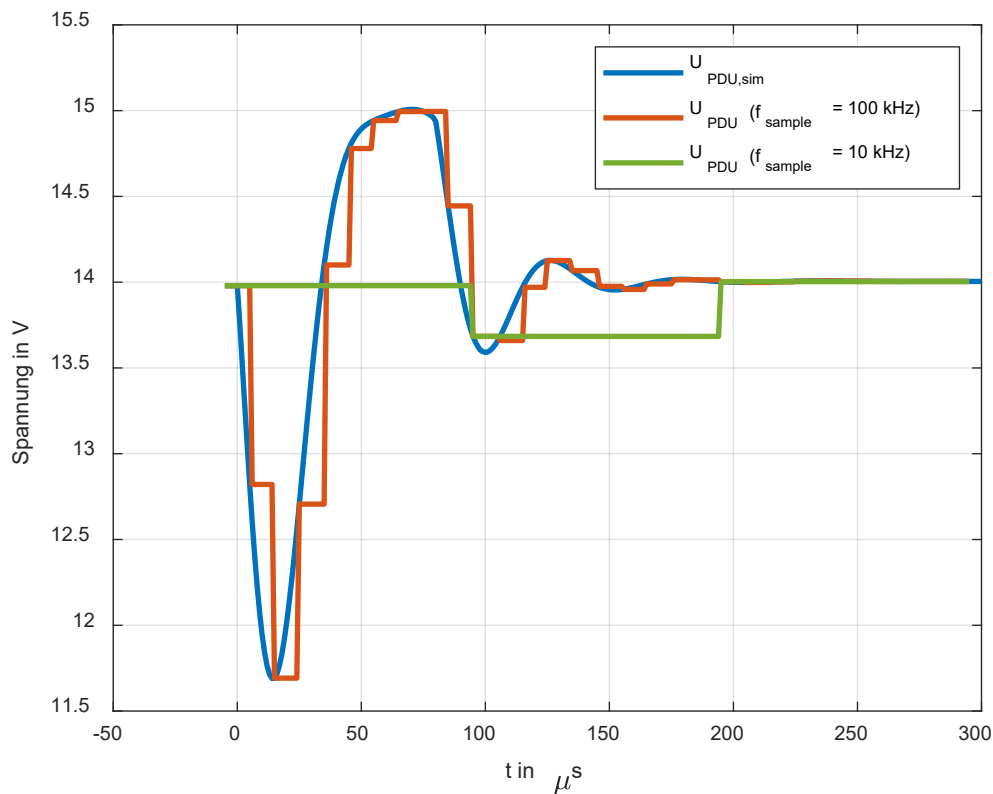


Abbildung 10: Nachbildung verschiedener Sample-Raten

Bei der nachträglichen Manipulation zur Nachbildung einer anderen Sample-Rate wird der Wert, der vorher zu einem Zeitpunkt simuliert wurde, weiterhin gehalten bis der neue Messwert nach

$$T = \frac{1}{f_{\text{sample}}}$$

aufgenommen werden kann. Beispielhaft sind hier Sample-Raten von 10 kHz und 100 kHz dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei einer Sample-Rate von 10 kHz nur noch sehr wenig des ursprünglichen Spannungsverlaufs erkannt werden kann und dies die Diagnose negativ beeinträchtigen sollte.

Die Analog-Digital Wandlung eines Sensors kann mit den implementierten Funktionen auch berücksichtigt werden. Hierbei wird die Quantisierung bei der Digitalwandlung durch die Berücksichtigung der maximalen Sensordynamik dargestellt. Die linearen Quantisierungsstufen ergeben sich demnach für die Spannung nach:

$$q_U = \frac{U_{\text{Max}} - U_{\text{min}}}{2^{n_{\text{bits}}}}$$

Die Sensorik kann in diesem Fall eine maximale Spannung U_{max} und eine minimale Spannung U_{min} messen und mit einer Genauigkeit von n_{bits} quantisieren. Beispielhaft könnte ein realer Sensor für ein 14 V Bordnetz einen Dynamikbereich von ± 30 V aufweisen. Anhand dieser Quantisierungsstufen und des aktuellen Wertes des Sensors kann dann der quantisierte Sensorwert bestimmt werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 11 dargestellt.

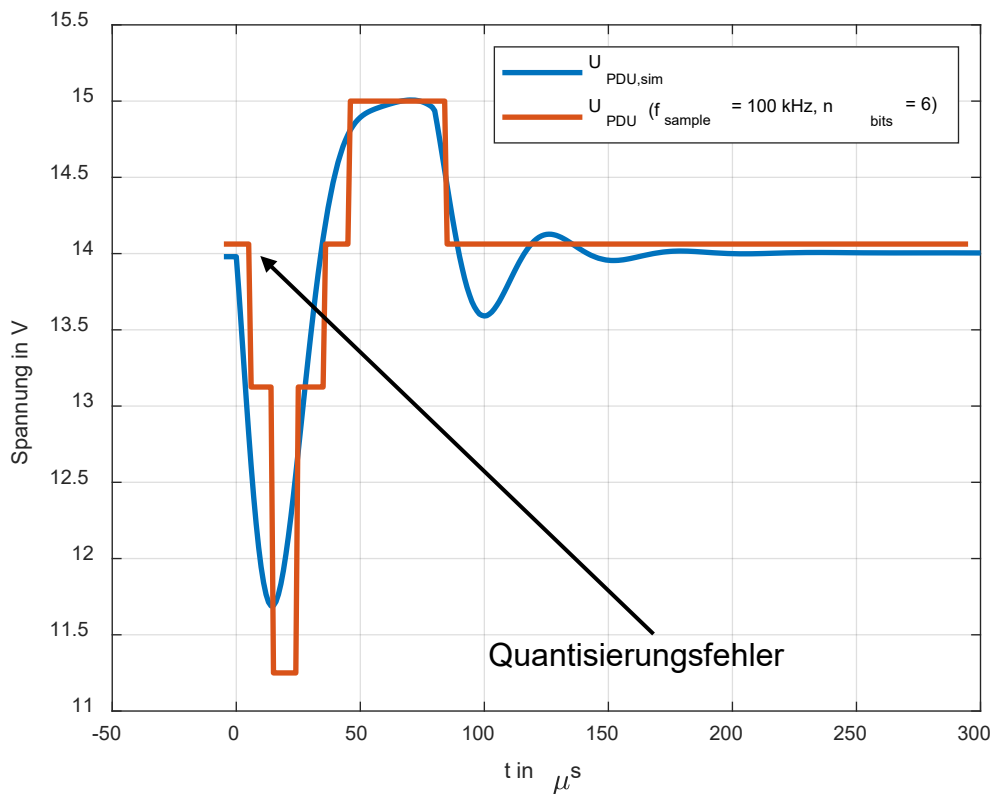


Abbildung 11: Nachträgliche Quantisierung der idealen Simulationsdaten

In der Abbildung ist zu sehen, wie sich ein Quantisierungsfehler bei einer Auflösung mit 6 bit auswirken kann. Zusätzlich zu der Variation der Sample-Rate kommt es hierbei nun zu einem weiteren Fehler durch die Quantisierung.

2.7 Diagnosekonzept und Datenvorverarbeitung

Im Rahmen des Projektes wurde zur Bestimmung des Alterungszustands der Eingangsschutzbeschaltung ein besonderer Fokus auf die Nachvollziehbarkeit der Methodik gelegt. Daher wurde unter den datenbasierten Verfahren ein erklärbarer KI-Ansatz verfolgt. Verwendet wurden Klassifizierungs- und Regressionsbäume. In diesem Kapitel wird zunächst das Diagnosekonzept erläutert. Dieses ist in Abbildung 12 dargestellt.

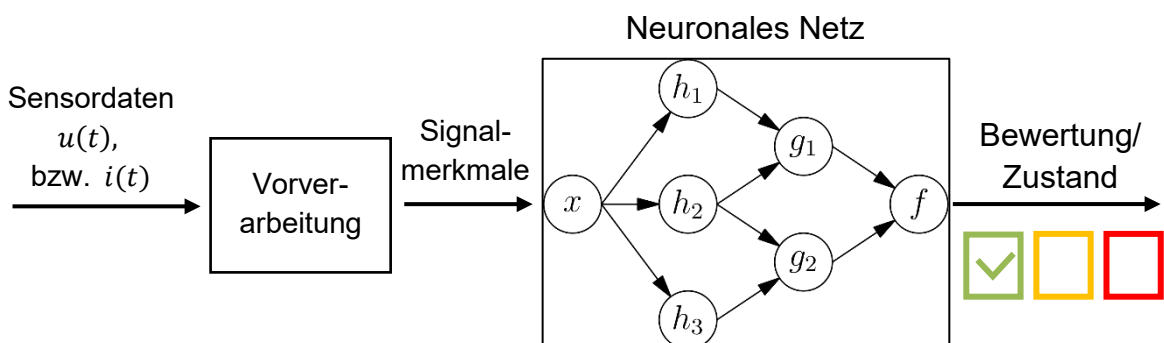


Abbildung 12: Diagnosekonzept zur Bewertung des Status der Eingangsschutzbeschaltung

Die Energieverteilereinheit misst bei jedem Einschalten des Verbrauchers die jeweiligen Strom- und Spannungsverläufe. Diese Verläufe werden im Vorfeld analysiert, um die Eingangsgrößen des neuronalen Netzes für die letztendliche Entscheidungsfindung bereit zu stellen. Am Ende wird der Zustand der Eingangsschutzbeschaltung bewertet und klassifiziert. Entweder befindet sich die Schaltung noch im zuvor definierten Toleranzband des Alterungszustands „neu“ oder in einem der anderen zwei Zustände.

Die Trainings- und Testdaten werden in der Simulation durch zufällige Parametervariationen anhand der zuvor definierten Parameterbereiche aus Abbildung 2 für die Kapazität generiert. Für die Klassifizierungsbäume müssen die Daten vorher den drei Klassen („neu“, „gealtert“ und „EOL erreicht“) zugeordnet werden. Die vorgegebenen, zufällig generierten, Parameterkombinationen für die Simulation geben dabei den Zustand der Eingangsschutzbeschaltung direkt vor, sodass es sich hier bei einem überwachten Lernprozess handelt. Während des Trainings werden verschiedene Regeln für die verschiedenen Abzweigungen des Klassifizierungsbaums aufgestellt. Eine beispielhafte Ausgabe aus Matlab nach dem Training ist zur Veranschaulichung des Klassifizierungsbaums in Abbildung 13 dargestellt.

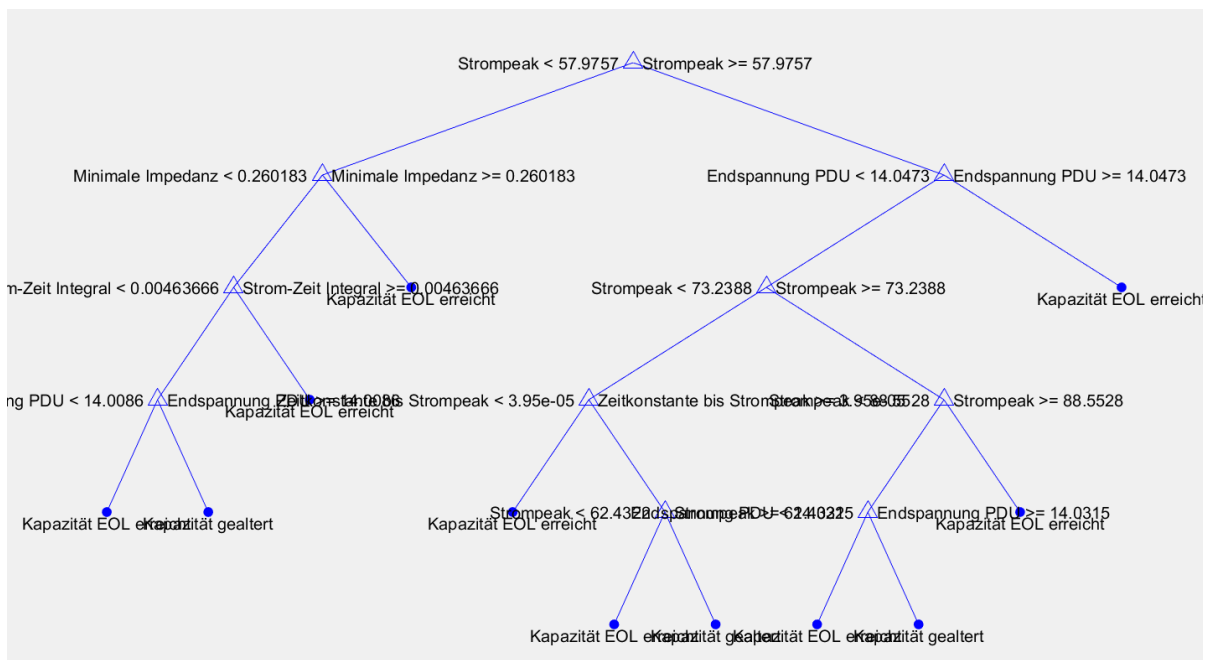


Abbildung 13: Beispielhafter Klassifizierungsbaum

Während des Trainings werden hier nachvollziehbare Regeln zur Auswertung der Signalmerkmale aufgestellt. Beispielsweise liefert der Strompeak in diesem Beispiel die erste Entscheidungsschwelle, bevor der Baum sich weiter aufteilt. Die Endknoten des Entscheidungsbaumes zeigen dann den final ausgegebenen Zustand des Modells.

2.8 Analyse relevanter Eingangsparameter

Im vorherigen Unterkapitel wurde bereits kurz auf die Datenvorverarbeitung eingegangen. Die Strom- und Spannungsprofile bestehen im Wesentlichen aus vielen einzelnen Sample-Punkten, die in einem Vektor in Matlab gespeichert sind. Eine Analyse wichtiger Signaleigenschaften, wie z.B. der maximal auftretende Strom oder der größte Spannungseinbruch, während des Einschaltens reduziert die Eingangsparameter für den Entscheidungsbaum. Jedoch können sehr viele verschiedene Analysen des Signals im Vorfeld durchgeführt werden. Deshalb wurden im Rahmen dieses Projektes verschiedene Eingangsparameter für das neuronale Netz

berücksichtigt und das Training unter Variation verschiedener Eingangsparameterkombinationen durchgeführt. Abbildung 14 zeigt eine Visualisierung der bestimmten Signaleigenschaften.

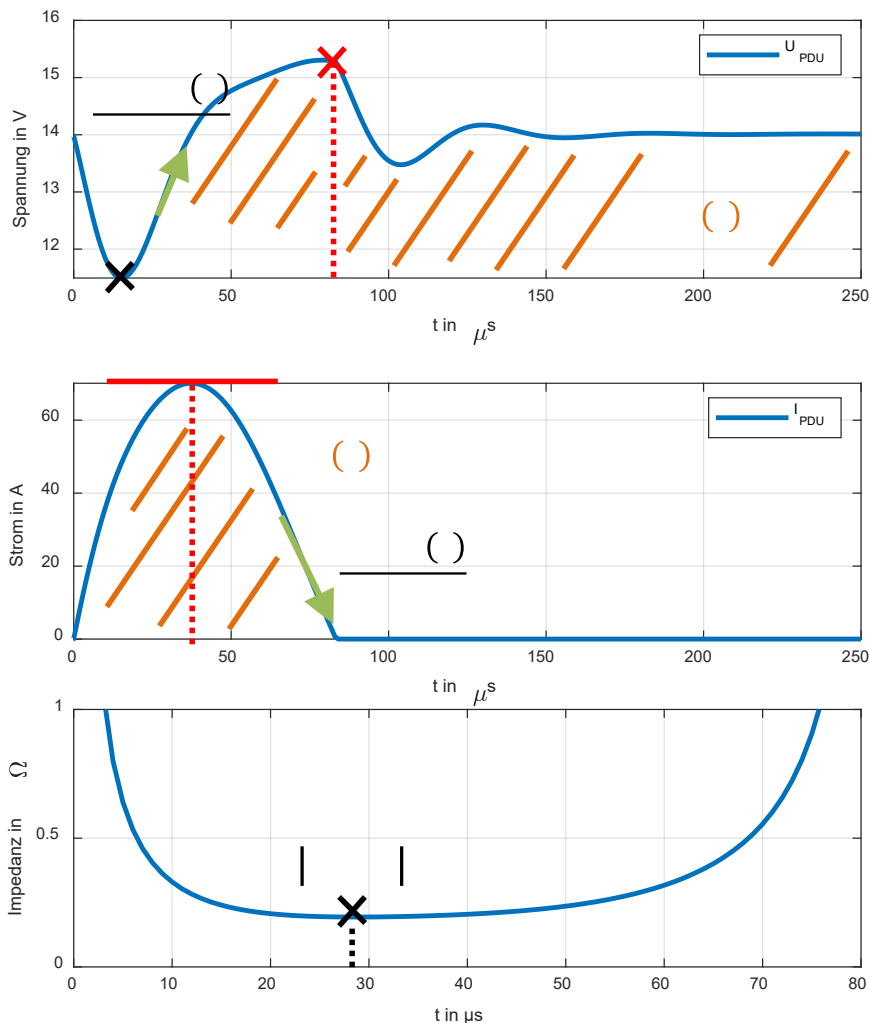


Abbildung 14: Visualisierung der berechneten Signaleigenschaften

In der Auswertung können zunächst viele dieser Parameter berücksichtigt werden. Die maximale, sowie minimale Spannung der Energieverteilereinheit kann berücksichtigt werden. Auch werden maximale und minimale Anstiegszeiten der Verläufe ausgewertet. Eigenschaften, wie das Strom-Zeit-Integral liefern beispielsweise direkte Zusammenhänge zwischen der gespeicherten Ladung der Kapazität, die auch mit der tatsächlichen Kapazität stark korreliert. Außerdem können anhand der Strom- und Spannungsverläufe zusätzlich eine betragsmäßige Impedanz bestimmt werden. Die minimale betragsmäßige Impedanz wird auch als eine potentielle Eingangsgröße verwendet, da diese in starker Korrelation mit dem Ersatzserienwiderstand steht. Eine Optimierung der Kombinationsmöglichkeiten der Eingangsparameter wurde im Verlaufe des Projektes durchgeführt.

Die in Abbildung 14 dargestellten Signaleigenschaften wurden für jeden Grenzfall der Klassifikation in 2 Klassen (i.O./n.i.O.) berechnet um redundante Informationen als Eingangsgrößen zu vermeiden und Eingangsgrößen ausfindig zu machen, in denen klare Unterschiede für verschiedene Parameterkombinationen erkennbar sind. Bei den Analysen blieben vor allem fünf Größen übrig: der maximale Strom, die Zeit bis zum Erreichen des Maximalstroms, das Strom-

Zeit-Integral, die Minimalspannung in der Energieverteilereinheit, sowie die minimale betragsmäßige Impedanz. Diese Signaleigenschaften wurden im Folgenden als Eingangsgrößen der Modelle weiterverwendet.

2.9 Ergebnisse der Klassifizierung

Nachdem die Eingangsparameter für das neuronale Netz analysiert wurden und verschiedene Kombinationen evaluiert wurden, konnte eine gute Kombination der Eingangsparameter gefunden werden. Bei den Ergebnissen war es zunächst das Ziel, die daten- und regelbasierten Verfahren mit einfach aufgestellten Regeln zu vergleichen um die Verwendung der künstlichen Intelligenz zu bestärken. Hierfür wurden in einem einfachen Skript Regeln aufgestellt, die die Berechnung der Signaleigenschaften an den Grenzen der Parameterräume berechnet und über UND-Bedingungen miteinander verknüpft. Dies ist in Abbildung 15 skizziert.

Auswertung Peakstrom [A]:

	R_{ESR}/C	$0,7 \cdot C_{nom}$ 280 μF	$1,3 \cdot C_{nom}$ 520 μF
$1,5 \cdot R_{nom}$	90 m Ω	62,1	73,3
$0,8 \cdot R_{nom}$	48 m Ω	74,9	91,6

↓ UND-Verknüpfung
der Bedingungen

Auswertung Stromintegral [mAs]:

	R_{ESR}/C	$0,7 \cdot C_{nom}$ 280 μF	$1,3 \cdot C_{nom}$ 520 μF
$1,5 \cdot R_{nom}$	90 m Ω	4,3	7,3
$0,8 \cdot R_{nom}$	48 m Ω	5	8,4

↓ UND-Verknüpfung
der Bedingungen

...

Abbildung 15: Einfacher regelbasierter Ansatz

Bei dem einfachen regelbasierten Ansatz werden von den Signaleigenschaften die maximalen und minimalen Werte zunächst einmal simuliert, gespeichert und zur Auswertung des Status genutzt. Anschließend werden die Werte mit UND-Bedingungen miteinander verknüpft. Da sich die berechneten Werte genau an den zuvor definierten Rändern des Parameterraums befinden, kann somit zwischen den zwei Klassen unterschieden werden. Der Vergleich der KI-basierten Regelaufstellung mit den einfachen Regeln, die hier aufgestellt wurden, ist in Abbildung 16 zu sehen.

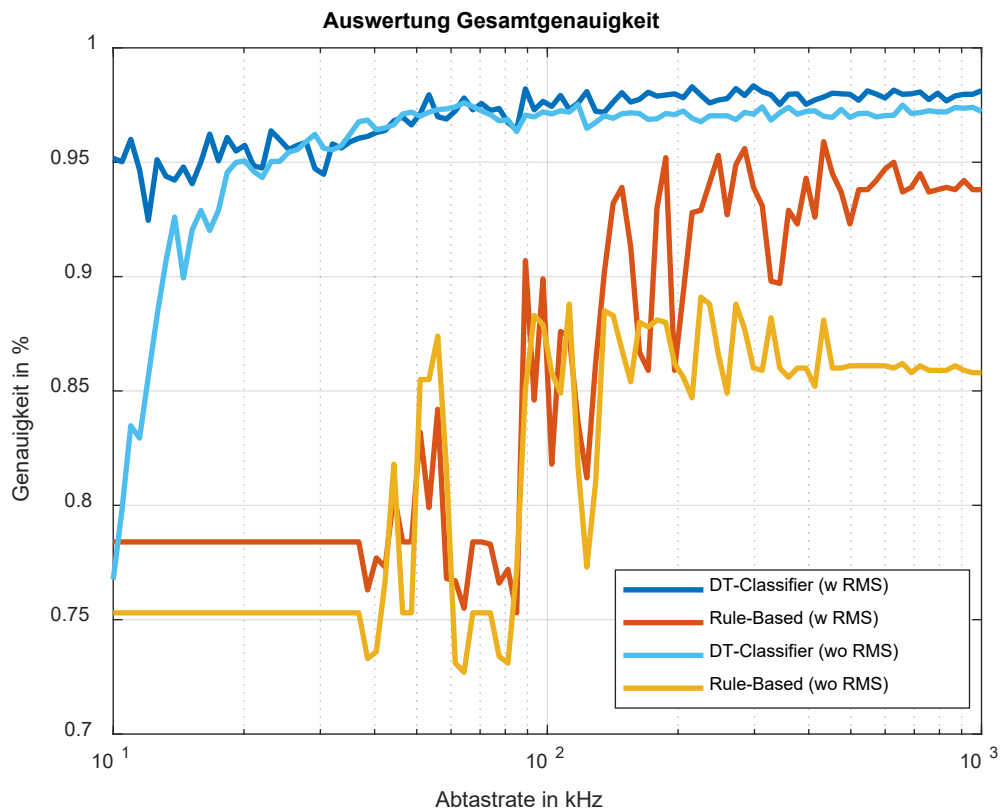


Abbildung 16: Vergleich des einfachen regelbasierten Ansatzes und der regelbasierten KI-Methode

Es zeigt sich, dass die aufgestellten Regeln beim Training des Modells (Decision Tree Classifier, „DT-Classier“) wesentlich komplexer ausfallen. Durch mehrere miteinander verknüpfte Bedingungen kann die Genauigkeit verbessert werden. Die einfache regelbasierte Auswertung erzielt hier wesentlich geringere Genauigkeiten in der Auswertung. Der Einfluss des RMS-Wertes als Eingangsgröße wurde zusätzlich untersucht, da dieser zunächst versprach weitere Informationen zu liefern. Dies kann auch in der einfachen regelbasierten Auswertung gesehen werden, jedoch unterschied sich der RMS-Wert nur sehr gering (in der zweiten bis dritten Nachkommastelle) und wurde bei leicht quantisierten Sensordaten bereits kaum auswertbar, weshalb dieser in den nachfolgenden Arbeiten nicht weiter genutzt wurde, da er zu hohe Anforderungen an die Sensorik stellen würde und außerdem bei der Klassifizierung mit der KI-Methode nur minimal besser abgeschnitten hat.

Die Analyse hat insgesamt gute Genauigkeiten von über 90 % gezeigt, konnte jedoch nie eine Genauigkeit von 100 % erreichen. Dies liegt an der Klassifizierung selbst, da eine harte Einteilung in eine der beiden Klassen vorgenommen wird. Eine falsche Klassifizierung am Randbereich des Parameterraums wäre vertretbar, jedoch sollten keine grob falschen Klassifizierungen auftreten. Dies wurde untersucht und ist in Abbildung 17 dargestellt.

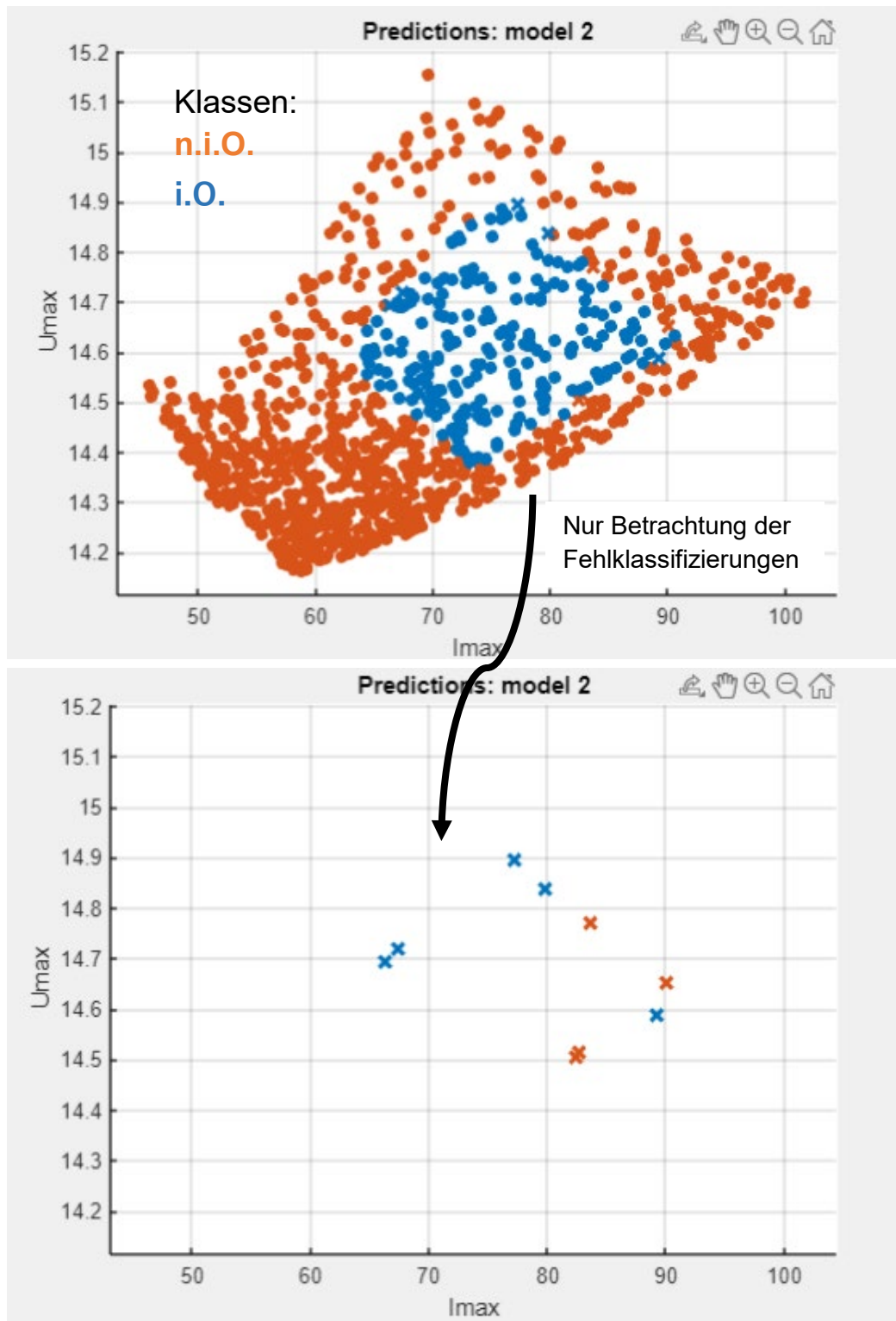


Abbildung 17: Analyse der Fehlklassifizierungen im Matlab Classification Learner

Dargestellt sind hier die maximale Spannung in der Energieverteilereinheit (y-Achse), sowie der maximal auftretende Strom (x-Achse). Diese Eigenschaften ändern sich für jede einzelne Parameterkombination aus dem Parameterraum aus Abbildung 3. Die Grenzübergänge von der Klasse „i.O.“ zu der Klasse „n.i.O.“ kann hier erkannt werden. Nach Ausblendung der richtig klassifizierten Fälle, bleiben nur noch wenige Grenzfälle übrig. Diese Fälle sind bei einem harten Zuweisen zu zwei Klassen scheinbar nicht klar zu trennen. Aus diesem Grund wurde im

nächsten Schritt eine direkte Regression der Parameter mit regelbasierten KI-Verfahren angestrebt.

2.10 Regression der Parameter

Die vorherigen Analysen zeigten schwer zu klassifizierende Einschaltvorgänge der zu diagnostizierenden Last in den Randgebieten des Parameterraums. Eine Genauigkeit von 100 % konnte bei der Klassifizierung nicht erreicht werden. Alternativ wurde eine direkte Regression der Parameter mit Regressionsbäumen untersucht. Für jeden Parameter der Eingangskapazität (C_{in} und R_{ESR}) entstand demnach ein eigener Regressionsbaum um anhand der Signaleigenschaften diese Parameter anzunähern. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für die Bestimmung der Parameter.

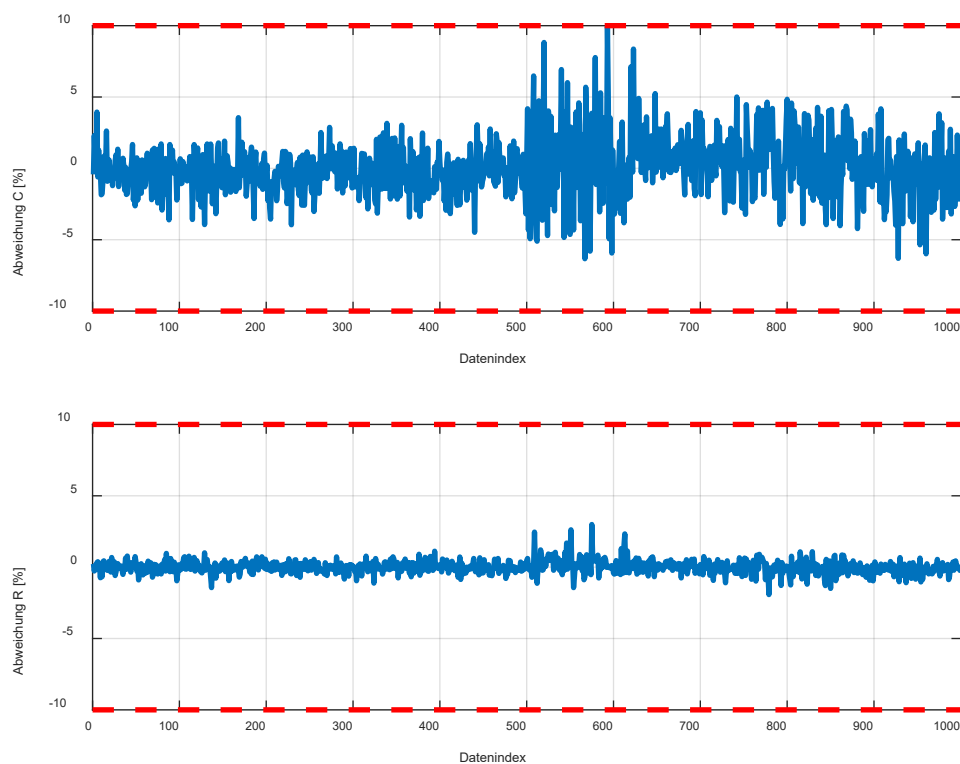


Abbildung 18: Regression der Parameter der Eingangskapazität mit regelbasierten KI-Verfahren

Dargestellt ist in diesem Fall die prozentuale Abweichung des tatsächlichen Parameters zum angenäherten Wert durch das verwendete Modell. Es kann gesehen werden, dass sowohl für den Kapazitätswert als auch für den ESR der Kapazität ein Toleranzband von maximal 10 % Abweichung in der Parameterbestimmung bei der Auswertung der Testdaten eingehalten werden kann.

2.11 Analyse der Sensorqualität

Im folgenden Teil des Projektes wurden abschließend die Auswirkungen eines Sensors auf das final aufgestellte Regressionsmodell analysiert. Da mit dem trainierten Modell für die Regression der Parameter in einem Toleranzband von 10 % die Parameter unter dieser Bedingung genau bestimmt werden konnten, wurde dieses Modell als Referenz gewählt. Die Ergebnisse bei Auswertung des 10 % Toleranzbandes sind in Abbildung 19 dargestellt.

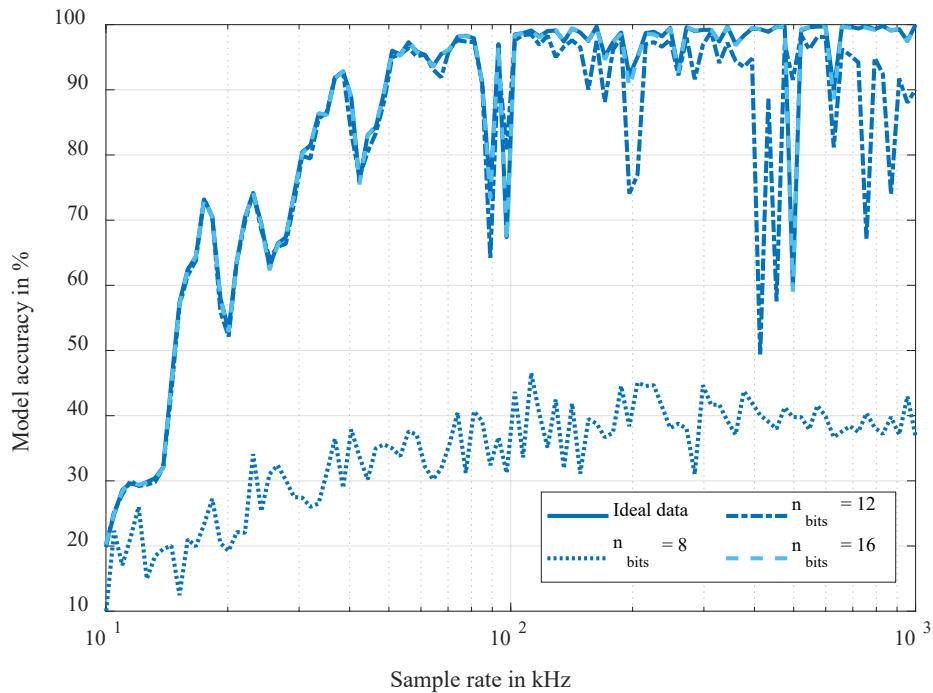


Abbildung 19: Analyse der Abtastrate und Quantisierung auf die Genauigkeit der Parameterregression

Es kann gesehen werden, dass bei niedrigen Abtastraten eine geringere Genauigkeit vorliegt und die Parameter nur für 20-30 % der verwendeten Testdaten mit einer maximalen Abweichung von 10 % bestimmt werden können. Mit steigender Abtastfrequenz steigt die Genauigkeit an. Mit einer Quantisierung von nur 8-bit kann keine höhere Genauigkeit als 40 % erreicht werden. Erst ab einer Quantisierung von 12-bit erreicht das Modell Genauigkeiten von 90 % oder mehr. Die genaue Bestimmung der Parameter ist in Abbildung 20 dargestellt.

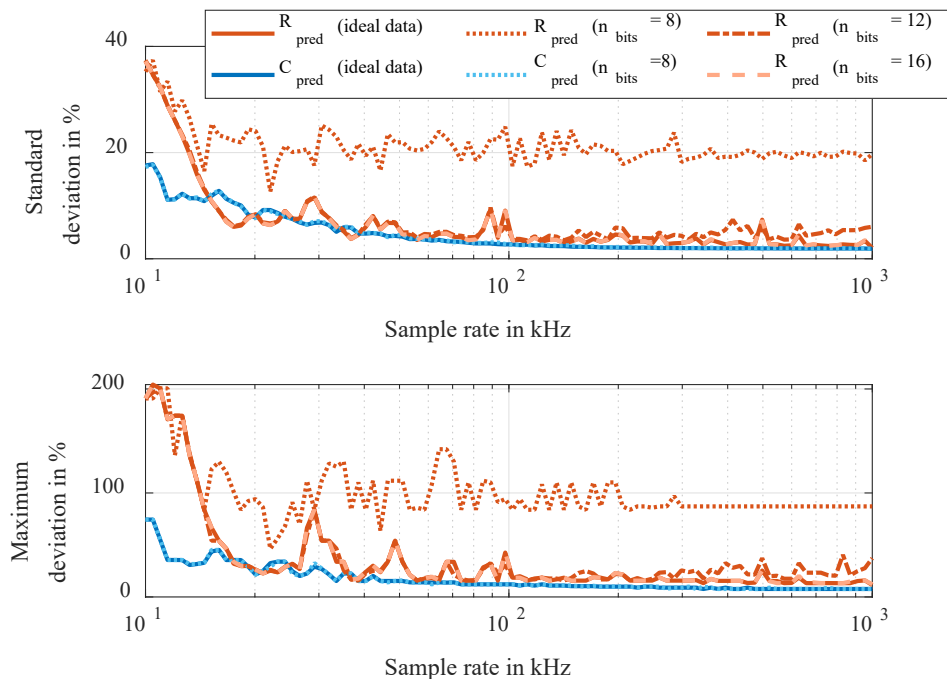


Abbildung 20: Analyse der Abtastrate und Quantisierung auf die Genauigkeit der einzelnen Parameterregressionen

Es zeigt sich, dass die Standardabweichung und die maximale Abweichung mit steigender Sensorqualität abfallen. Vor allem zur genauen Bestimmung des ESR muss die Sensorik eine hohe Qualität aufweisen. Die Bestimmung der Kapazität ist zunächst sehr stabil und nur sehr wenig von der Sensorqualität abhängig.

3 Diagnose von echtzeitkritischen Kfz-Energiebordnetzfehlern

Im Rahmen des zweiten Teils des Projektes wurden außerdem Verfahren zur Diagnose von echtzeitkritischen Energiebordnetzfehlern entwickelt und untersucht. Echtzeitkritische Fehler können beispielsweise Leitungsfehler (z.B. Kurzschlüsse oder Leerläufe) sein. Auch Komponentenfehler, die z.B. im DC/DC-Wandler stattfinden können, wurden nachgebildet und untersucht. Das Konzept verwendet dasselbe Sensorkonzept, das bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde. Eine korrekte Erkennung der Fehler, sowie deren Lokalisierung wurde untersucht.

3.1 Online-Diagnose von Energiebordnetzfehlern

Zur Erkennung der Energiebordnetzfehler wurde ein datenbasiertes Konzept entwickelt. Im Vergleich zum vorher diskutierten Konzept werden hier allerdings keine regelbasierten KI-Verfahren genutzt. zeigt das grundlegende Diagnosekonzept.

Die Messdaten der Sensorik (Strom- und Spannungsverläufe innerhalb der Energieverteilereinheit) werden zunächst gemessen. Das Konzept ermöglicht eine Einteilung dieser Daten in zeitliche Intervalle mit der Zeit T_{int} . Dies hat den Vorteil, dass mehrere Sample-Punkte zu einem Intervall zusammengefasst werden können und somit beispielsweise Effekte wie Rauschen aus den Messdaten durch Mittelwertbildung reduziert werden können. Die einzelnen zeitlichen Intervalle werden für die Auswertung genutzt und die Entscheidungsparameter werden für jedes Intervall aufgestellt. Hierbei werden verschiedene Entscheidungsparameter als Eingangsgrößen für das neuronale Netz berechnet. Am Ende der Diagnose steht die Klassifizierung des Fehlers und des Fehlerortes durch das trainierte neuronale Netz.

Allerdings kann es durch die Auswertung des neuronalen Netzes auch zu Fehlklassifizierungen sowohl des Fehlers als auch des Fehlerortes kommen. Dadurch, dass ein falsch diagnostizierter Fehler ein potentiell großes Sicherheitsrisiko sein kann, wurde das Konzept um eine nachträgliche Auswertung zur Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit erweitert. Dies ist im zweiten Teil von Abbildung 21 dargestellt.

Die Ausgabe des neuronalen Netzes sieht die Fehlerklassifikation vor. Diese Entscheidung wird kontinuierlich für jedes ausgewertete Intervall ausgegeben und kann sich auch bei der Auswertung von Intervall zu Intervall unterscheiden. In diesem Beispiel würde der Fehler Kurzschluss auf Leitung 1 („sc 1“) über die ausgewerteten Intervalle 3 bis 6 ausgegeben werden. An dieser Stelle wird ein weiterer Designparameter für das Diagnosekonzept eingeführt. Das Abbruchkriterium zur finalen Entscheidungsfindung lässt sich mit dem Designparameter n_A beschreiben. Erst nach n_A -facher Bestätigung des Fehlers wird das finale Diagnoseergebnis bestätigt und Handlungen im Energiebordnetz zur Isolation des Fehlers durchgeführt. Dies verringert die Fehleranfälligkeit des Gesamtkonzepts für falsche Klassifizierungen von einzelnen Intervallen, da der Fehler mehrfach bestätigt werden muss, bis eine finale Entscheidung getroffen wird. Die Erhöhung des Abbruchkriteriums zur korrekten Klassifikation ist in Abbildung 22 für ein einfaches Beispiel dargestellt.

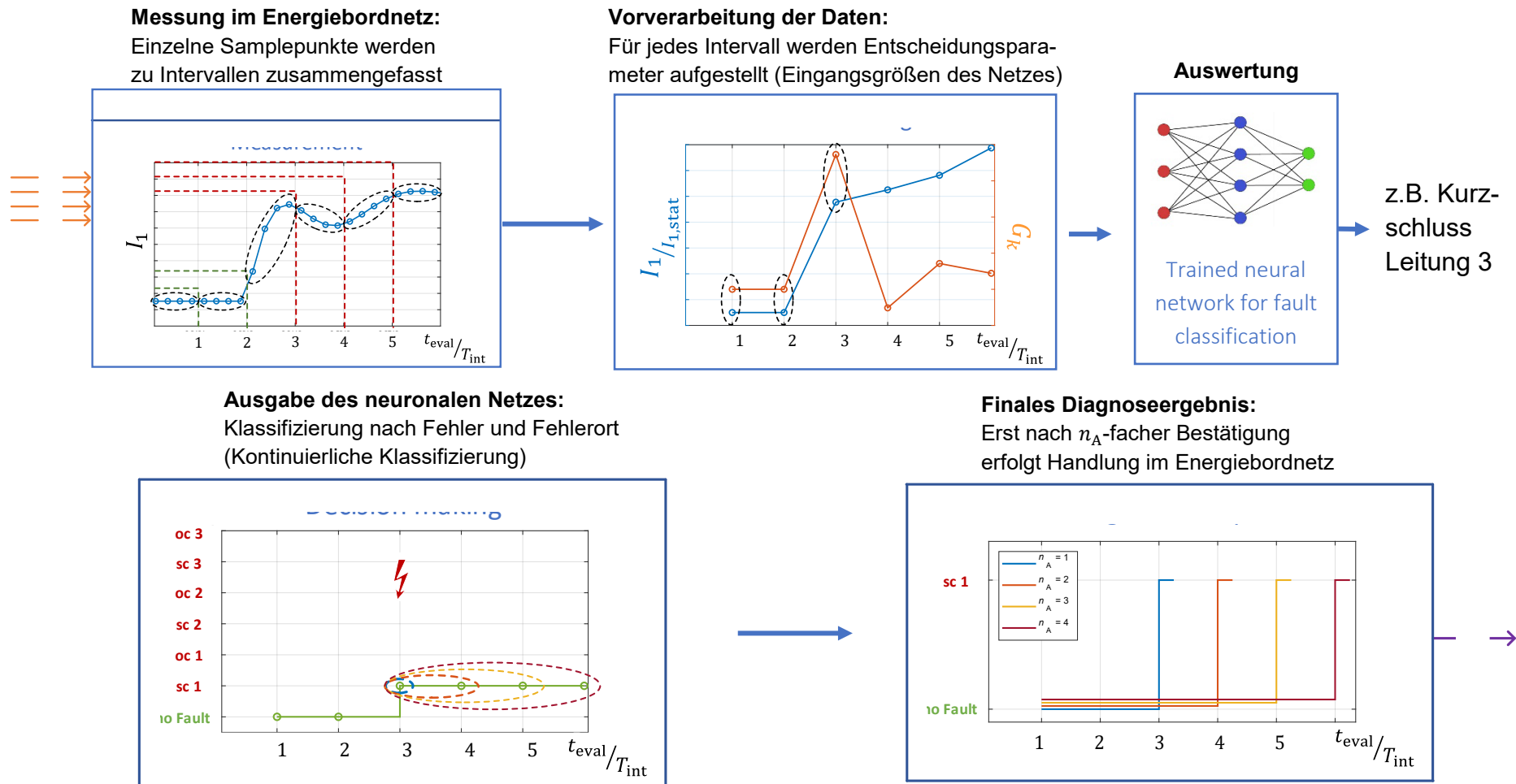


Abbildung 21: Online-Diagnosekonzept für Kfz-Energiebordnetzfehler

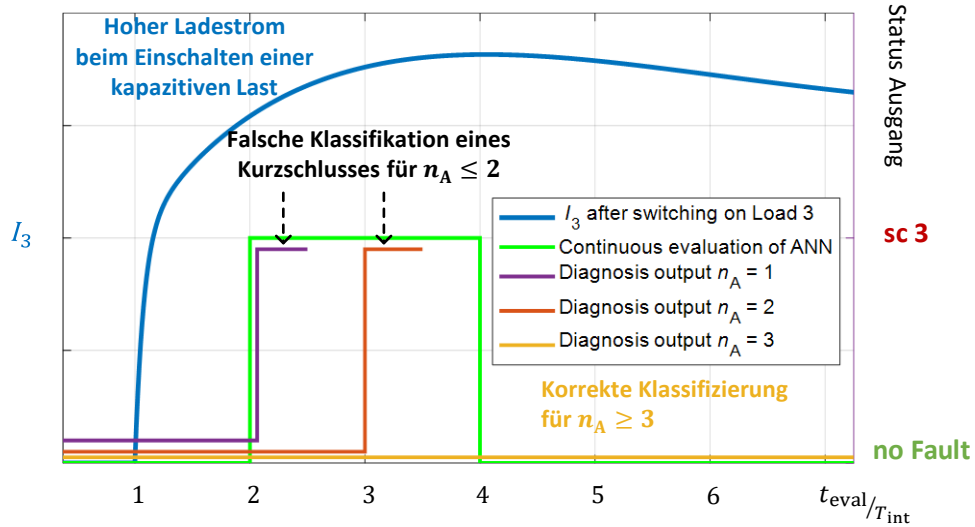


Abbildung 22: Beispiel zur Erhöhung der Genauigkeit durch das Abbruchkriterium

Bei dem Einschalten einer kapazitiven Last im Energiebordnetz kann es zu einem hohen Ladestrom der Kapazität führen. Dieser hohe Ladestrom wird bei einer kontinuierlichen Auswertung (grün) für die Intervalle 2 bis 4 zunächst als Kurzschluss klassifiziert und im Intervall 5 wieder als Nominalbetrieb erkannt. Erst ab einem Abbruchkriterium von $n_A = 3$ kann der Fehler in diesem Fall korrekt klassifiziert werden.

3.2 Entscheidungsparameter für die Diagnose

Als Eingangsgrößen des neuronalen Netzes werden zunächst die Sensordaten vorverarbeitet und Entscheidungsparameter für jedes Intervall aufgestellt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 23 dargestellt.

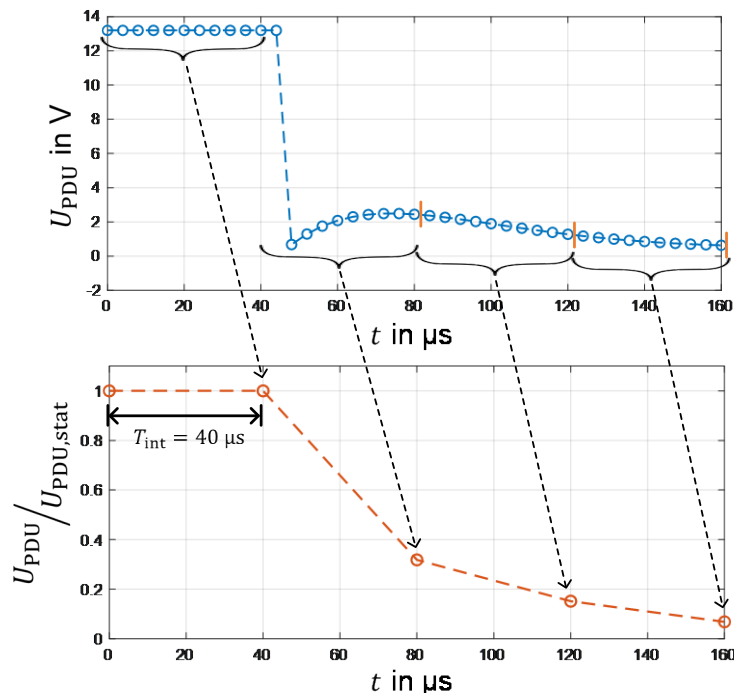


Abbildung 23: Bildung des Mittelwertes der Sensordaten als Entscheidungsparameter für das neuronale Netz

Dargestellt ist in diesem Beispiel die Auswertung der Spannung in der Energieverteilereinheit. Eine Intervalllänge von $T_{\text{int}} = 40 \mu\text{s}$ wird bei der Auswertung verwendet. Es kann erkannt werden, dass die einzelnen Messwerte zu einem Intervall zusammengefasst sind. In diesem Beispiel wird der Mittelwert der Spannung gebildet und auf den Wert vor Beginn des Fehlers normiert. Ein weiterer Entscheidungsparameter ist der Gradient. Der maximal betragsmäßige linksseitige Gradient wird für jedes Intervall ausgewertet. Diese Entscheidungsparameter werden für jeden Sensor (Strom- oder Spannungssensor) einzeln ausgewertet. Ein weiterer Entscheidungsparameter wird über einen Zuschaltparameter gebildet. Die Bildung des Zuschaltparameters ist in Abbildung 24 dargestellt.

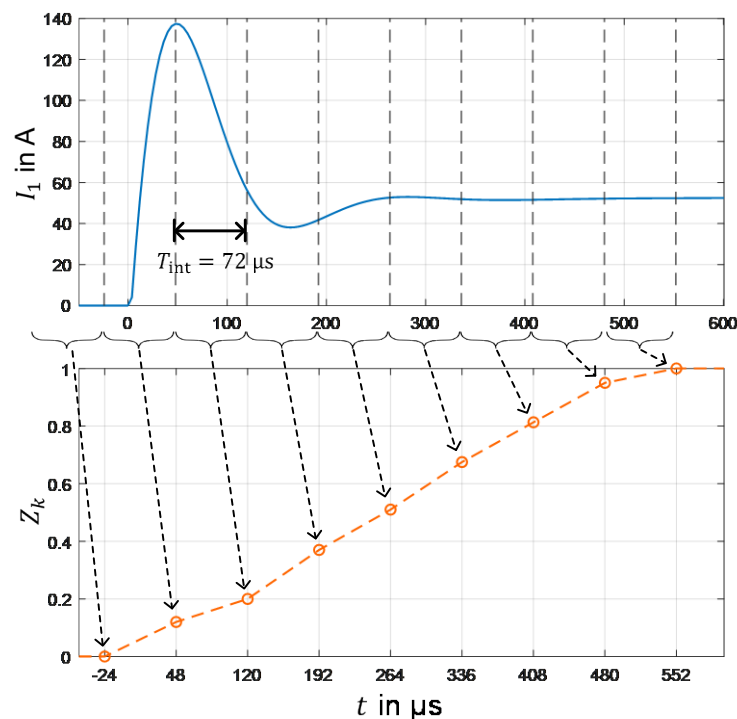


Abbildung 24: Bildung des Zuschaltparameters

Der Zuschaltparameter hat das Ziel das neuronale Netz über den aktuellen Soll-Zustand zu informieren. Falls eine Last im Energiebordnetz versorgt wird, beträgt der Parameter 1. Falls eine Last ausgeschaltet sein soll, hat der Parameter den Wert 0. Diese Information ist zur Auswertung wichtig, da hiermit zwischen einem gewollten und ungewollten Verhalten des Energiebordnetzes unterschieden werden kann. Der Zuschaltparameter wird hierbei anhand der Zeitkonstanten der Verbraucher normiert, sodass nach vollständigem Abklingen des Einschaltverhaltens die 1 erreicht wird. Die Zeitkonstanten ergeben sich aus dem Eingangsverhalten der Komponente. Insgesamt ergibt sich also die Anzahl der gesamten Entscheidungsparameter anhand der verwendeten Sensoren:

$$n_{\text{Parameter}} = n_{\text{Sensoren}} \cdot n_{\text{Sensorparameter}} + n_{\text{Sicherungen}}$$

Die Gesamtanzahl der Entscheidungsparameter hängt von der Anzahl der Sensoren ab. Für jeden Sensor werden die jeweiligen Sensorparameter aufgestellt (hier: Mittelwert und Gradientenbildung für jedes Intervall). Abhängig von der Anzahl der verwendeten Sicherungen ergibt sich dann die Anzahl der verwendeten Zuschaltparameter, die berücksichtigt werden.

3.3 Untersuchte neuronale Netzstrukturen

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Ansätze zur Klassifikation der Fehler untersucht. Der erste Ansatz, der untersucht wurde, beinhaltet eine quasikontinuierliche Betrachtung der Intervalle. Hierbei wurde jedes Intervall getrennt voneinander betrachtet und klassifiziert. Die zweite Netzstruktur wurde erweitert um eine Schicht, die über ein Gedächtnis verfügt, sodass vorherige Intervalle bei der Auswertung auch berücksichtigt werden können und eine vollständig kontinuierliche Auswertung erfolgen kann. Die beiden verwendeten neuronalen Netzstrukturen sind in Abbildung 25 dargestellt.

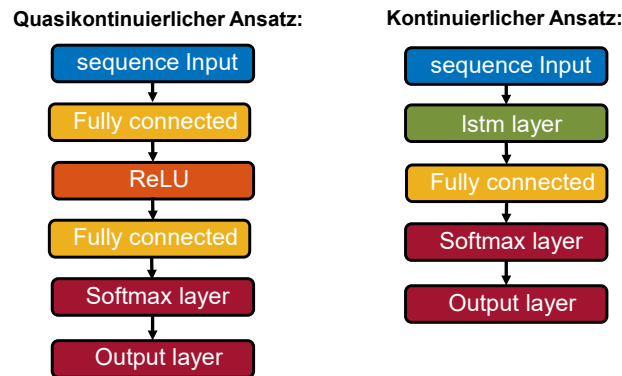


Abbildung 25: Verwendete Netzstrukturen für die neuronalen Netze

Die Intervalle werden in beiden Fällen als ein sequenzieller Eingang des Netzes betrachtet, da es sich um zeitliche Verläufe handelt. Bei dem quasikontinuierlichen Ansatz werden ausschließlich voll verbundene Schichten genutzt, während bei dem kontinuierlichen Ansatz eine LSTM-Schicht (Long-Short-Term-Memory) verwendet wird. Bei der Verwendung von LSTM-Schichten wird auch von rekursiven neuronalen Netzstrukturen gesprochen, da diese in der Lage sind auch Informationen über die Vergangenheit mit einzubeziehen. Am Ende des Netzes steht eine Softmax-Funktion, die häufig in Verbindung mit Klassifizierungsproblemen verwendet wird bevor die Klassifizierung in der Ausgangsschicht ausgegeben wird.

3.4 Anwendung des Konzeptes für Leitungsfehler

Zur Erkennung von Leitungsfehlern wurde ein Energiebordnetzmodell aufgestellt. Das untersuchte Energiebordnetz ist in Abbildung 26 dargestellt.

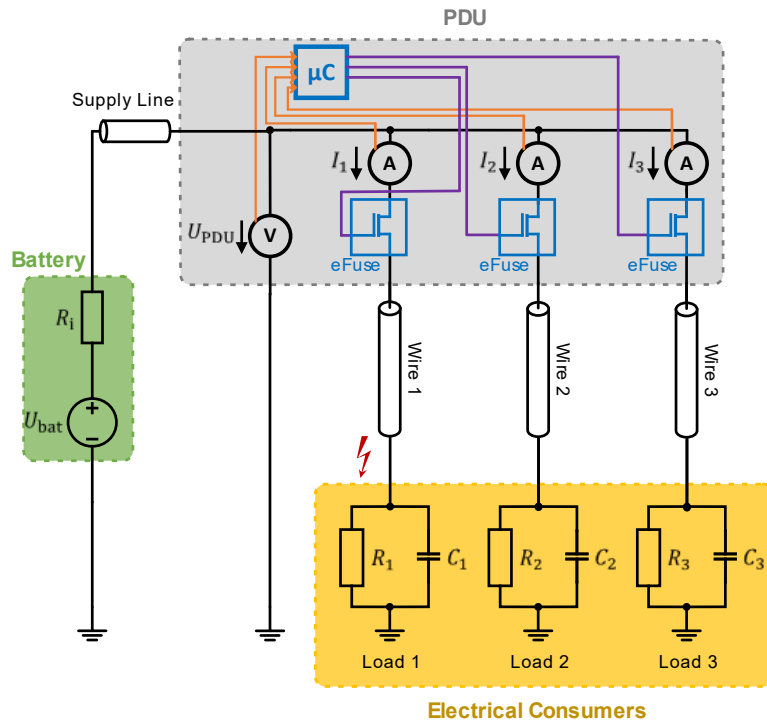


Abbildung 26: Beispielbordnetz zur Untersuchung der Diagnose von Leitungsfehlern

In diesem Energiebordnetz wird eine Batterie zur Energieversorgung genutzt. Die Energieverteilereinheit besteht in diesem Fall aus 3 elektronischen Sicherungen. Die Spannung in der Energieverteilereinheit wird auch gemessen, sodass sich insgesamt in diesem Beispiel eine Gesamtanzahl der Entscheidungsparameter $n_{parameter} = 4 \cdot 2 + 3 = 11$ ergibt. Zur Erkennung und Lokalisierung der Leitungsfehler wurde der quasikontinuierliche Ansatz verwendet.

Zur Generierung der Trainingsdaten wird das Energiebordnetz in verschiedenen Szenarien simuliert. Die Simulation wurde in Matlab Simulink/Simscape durchgeführt. Die verwendeten Modelle wurden analog zu den Modellen aus OpenModelica des Vorgängerprojektes [1] implementiert. In der Simulation werden ausschließlich Einzelfehler betrachtet. Die Szenarien lassen sich in folgende Fälle einteilen:

- Verbraucher werden bewusst zu- und abgeschaltet (Nominalzustände, kein Fehler liegt vor)
- Fehlermodelle werden während der Simulation zu unterschiedlichen Zeiten aktiviert (Kurzschlüsse und Leerläufe am Anfang oder am Ende einer Leitung)
- Kurzschlüsse werden auch bei direktem Zuschalten des Verbrauchers betrachtet und die Fehlermodelle aktiviert

Bei den unterschiedlichen Kombinationen der Szenarien ergaben sich letztendlich 3975 Trainingsszenarien und 1530 Testszzenarien um die Genauigkeit des neuronalen Netzes bei neu vorliegenden Daten zu beurteilen. Abbildung 27 zeigt die durchschnittliche Erkennungszeit zur korrekten Identifikation und Lokalisierung der Leitungsfehler.

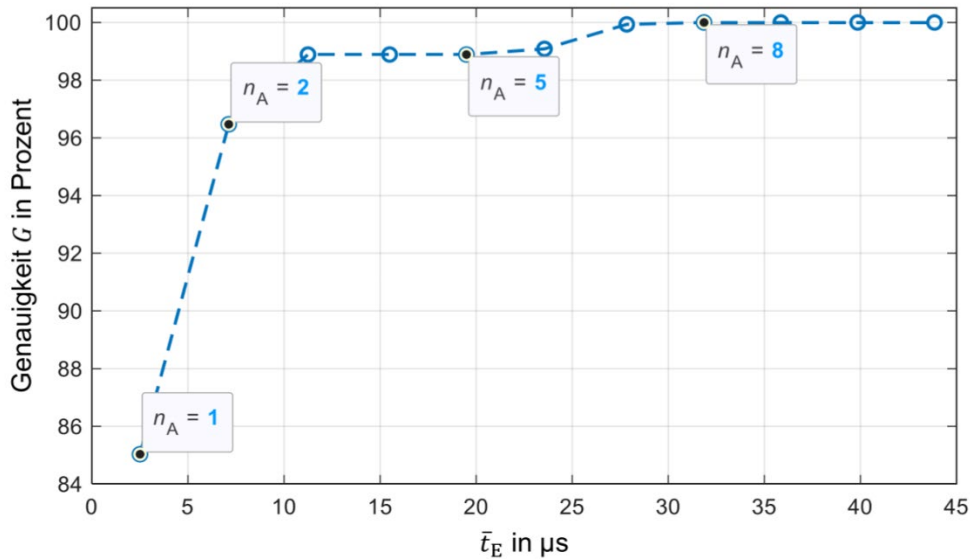


Abbildung 27: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit für Leitungsfehler

Die Diagnose der Leitungsfehler kann mit einer Genauigkeit von etwa 85 % durchgeführt werden, wenn das Abbruchkriterium $n_A = 1$ gewählt wird. Durch Erhöhung des Abbruchkriteriums kann die Genauigkeit bis zu $n_A = 8$ auf 100 % erhöht werden. Da das Abbruchkriterium auch die Anzahl der nacheinander auszuwertenden Intervalle berücksichtigt, erhöht sich hier auch die durchschnittliche Erkennungszeit für die hier verwendete Intervalldauer von $T_{int} = 4 \mu s$. Außerdem wurden für unterschiedliche Intervalldauern die durchschnittlichen Erkennungszeiten für eine Erkennung mit einer Genauigkeit von 100 % untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 zu sehen.

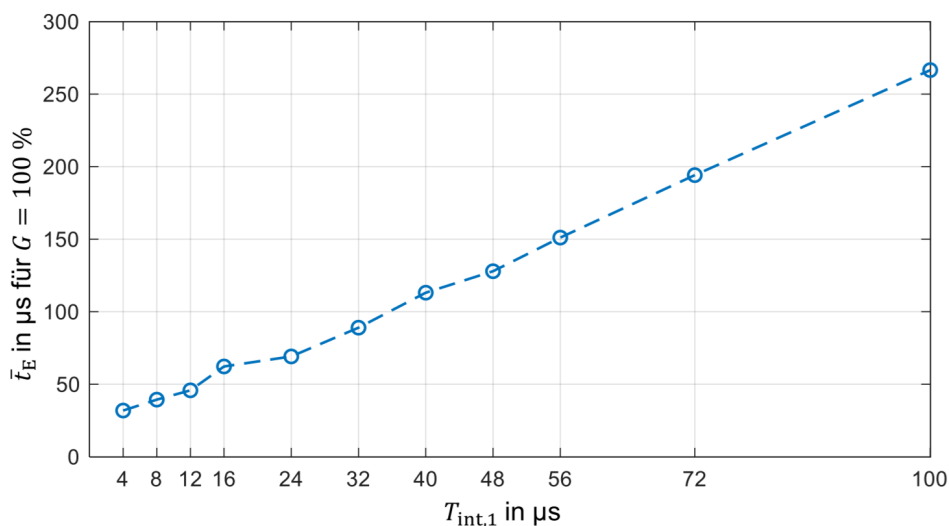


Abbildung 28: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit in Abhängigkeit der Intervalldauer

Es kann gesehen werden, dass die Erkennungszeit bei höheren Intervalldauern proportional zunimmt. Ausgewertet wurden in diesem Fall immer die optimale Anzahl n_A des Abbruchkriteriums um eine Genauigkeit von 100 % zu erzielen.

3.5 Analyse weiterer Energiebordnetzfehler

Zunächst wurde das erarbeitete Konzept für Leitungsfehler eingesetzt. Im Vorgängerprojekt [1] wurden allerdings auch Komponentenfehlermodelle aufgestellt. Die simulierten Szenarien

haben sich demnach um weitere mögliche Fehlerfälle erweitert. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Komponentenfehlermodelle und Fehlermöglichkeiten.

Komponentenfehlermodell	Fehlermöglichkeiten
DC/DC – Wandler	0: kein Fehler 1: Zu große Pulsweite 2: Zu geringe Pulsweite 3: Verringerter Wirkungsgrad 4: Ausgangsseitiger Kurzschluss
Batterie	0: kein Fehler 1: Zellenfehler (Kurzschluss) 2: Zellenfehler Leerlauf (seriell) 3: Zellenfehler Leerlauf (parallel)
Leitungen	Kurzschlüsse Leerläufe Kurze Unterbrechungen (Wackelkontakt des Steckverbinders)
Generator	0: Kein Fehler 1/2: Quellenfehler – Leerlauf/Kurzschluss 3/4: Diodenfehler – Leerlauf/Kurzschluss 5/6: Kondensatorfehler – Leerlauf/Kurzschluss

Tabelle 1: Komponentenfehlermodelle und Fehlermöglichkeiten

Das erarbeitete Diagnosekonzept wurde iterativ um die weiteren Fehlermöglichkeiten erweitert. Die Generatorfehler wurden in diesem Projekt vernachlässigt. Einerseits hat sich das im Vorgängerprojekt genutzte Modell als nicht geeignet zur Generierung von Trainingsdaten erwiesen. Andererseits wird der Generator in zukünftigen Bordnetzen immer weiter in den Hintergrund rücken, da hauptsächlich Batterien und Wandler zur Energieversorgung eingesetzt werden. Das Energiebordnetzmodell wurde zunächst um einen DC/DC-Wandler erweitert, sodass die Fehler aus Tabelle 1 simuliert werden können. Abbildung 29 zeigt das aktualisierte Energiebordnetz.

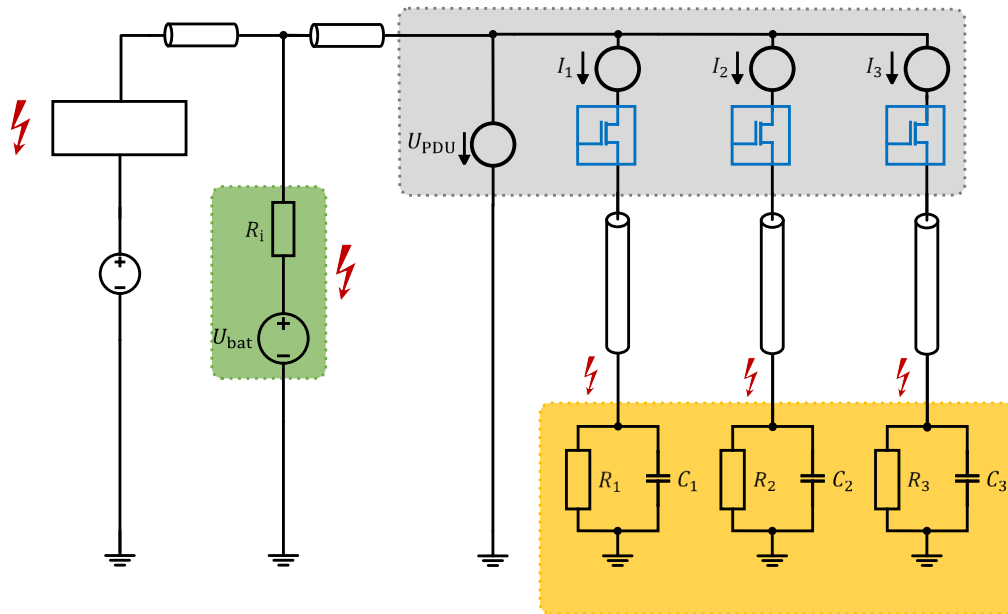


Abbildung 29: Erweitertes Energiebordnetz

Die linke Seite des Energiebordnetzes wurde zusätzlich um einen DC/DC-Wandler erweitert. Dieser wandelt die 48 V Spannung herunter auf die 14 V Bordnetzspannung. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Erweiterung um die DC/DC-Wandler Fehler.

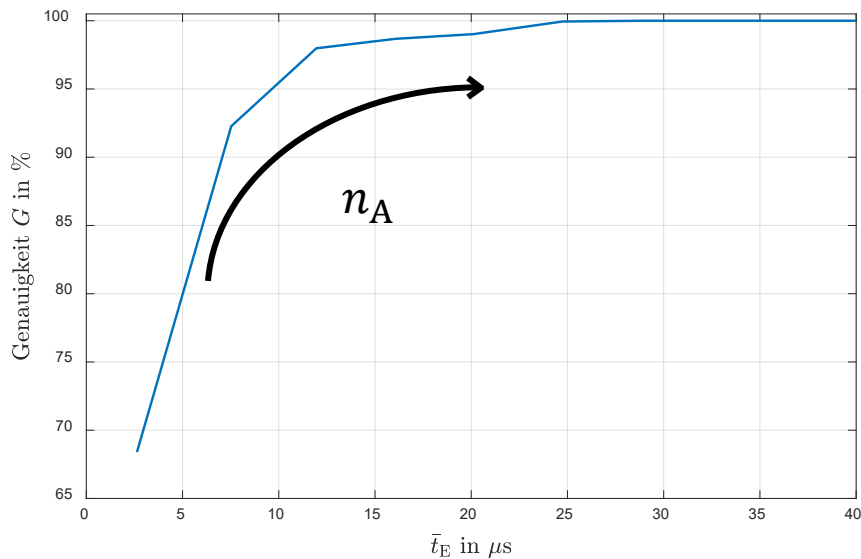


Abbildung 30: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit bei Erweiterung um DC/DC-Wandler Fehler

Bei der Erweiterung um das Wandlerfehlermodell konnte auch hier eine Genauigkeit von 100 % bei einer durchschnittlichen Erkennungszeit von etwa 30 μs erzielt werden. Auch die Batteriefehler konnten in weiteren Untersuchungen zuverlässig erkannt werden.

Ein weiterer Fehlerfall der betrachtet wurde, sah kurze Unterbrechungen der Versorgung einer Last vor. Dies könnte beispielsweise durch einen Wackelkontakt eines Steckverbinders ausgelöst werden. Hierfür wurden in der Simulation ideale Schalter genutzt und die Schaltzustände, wie in Abbildung 31 dargestellt, definiert

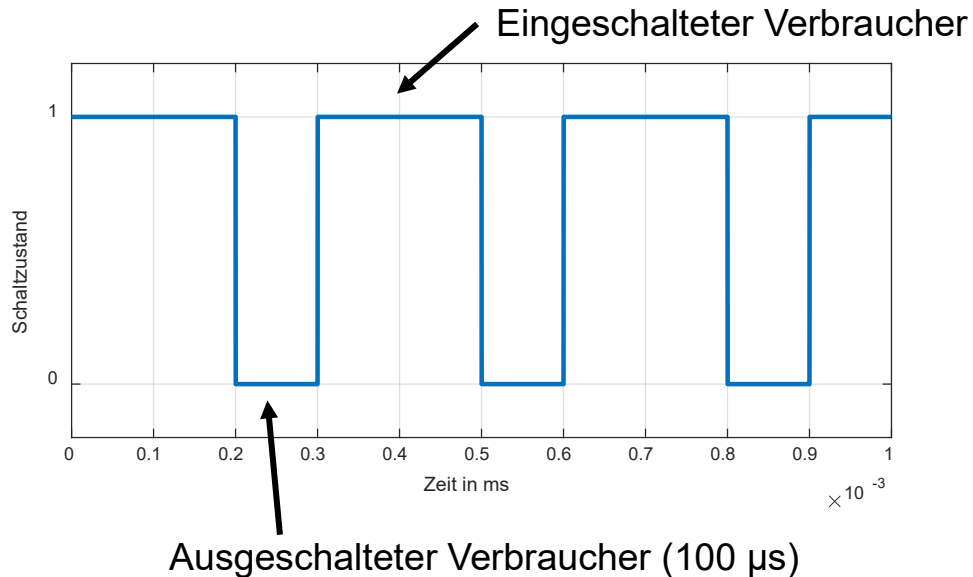
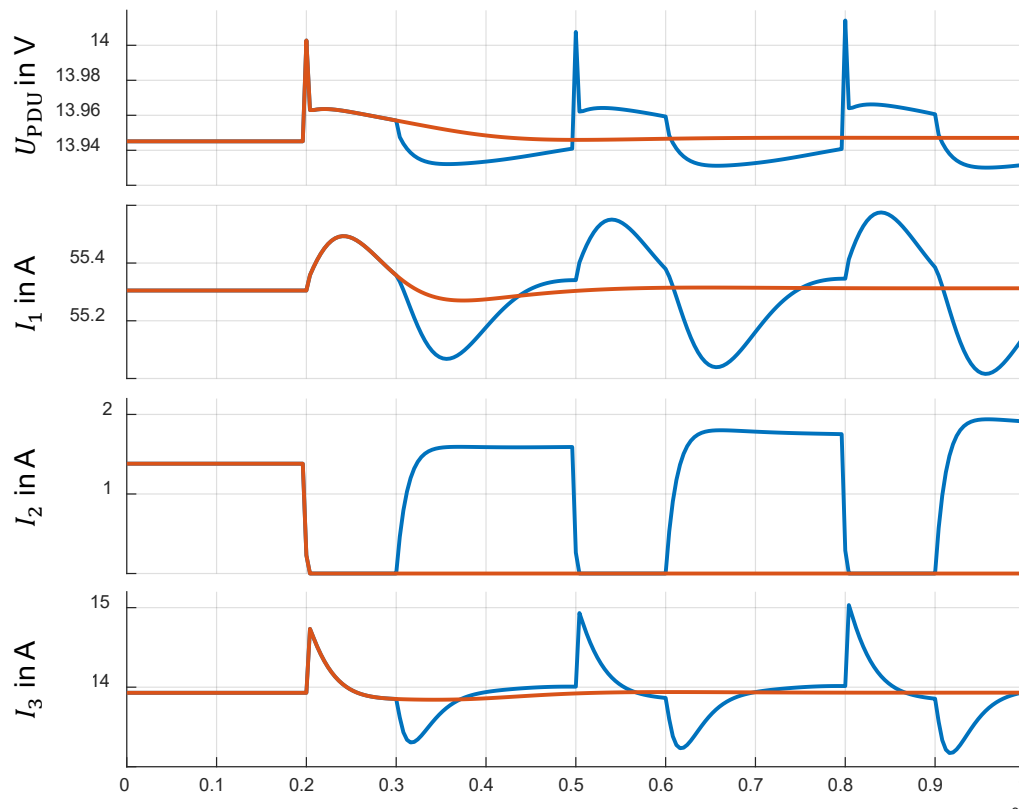


Abbildung 31: Schaltzustände zur Nachbildung von mehreren kurzen Unterbrechungen der Versorgung

Es kann gesehen werden, dass die Verbraucher nach dieser Definition für 100 μ s abgeschaltet werden. Der Abschaltung folgt ein Wiedereinschalten für 200 μ s. Danach wiederholt sich der Ein- und Ausschaltvorgang mehrfach. Die Herausforderung bestand an dieser Stelle hierbei, dass dieser Fehler klar von dem Leitungsfehler Leerlauf unterschieden werden muss, obwohl beide Fehler ein ähnliches Verhalten zueinander aufweisen. Abbildung 32 zeigt einen Vergleich dieser Fehlerfälle.



- Kurze Unterbrechung an Verbraucher 2
- Leerlauf an Verbraucher 2

Abbildung 32: Vergleich der kurzen Versorgungsunterbrechungen mit einem Leerlauf einer Leitung

Dargestellt sind hier die einzelnen Verbraucherströme, sowie die Spannung in der Energieverteilereinheit während der Unterbrechungen der Energieversorgung. In allen Sensoren kann beobachtet werden, dass die Unterscheidung der Fehlerfälle erst beim Wiedereinschalten des Verbrauchers möglich ist, da sich die zeitlichen Verläufe zuvor nicht unterscheiden.

In den weiteren Untersuchungen hat sich an dieser Stelle eine Genauigkeit der Fehlererkennungsgenauigkeit von etwa 95 % ergeben. Eine klare Klassifikation und Trennung zwischen Leerlauf Fehlern und kurzen Versorgungsunterbrechungen war nicht möglich. Hierzu zeigt Abbildung 33 den Verlauf der kurzen Unterbrechungen an Last 1 im Beispielbordnetz.

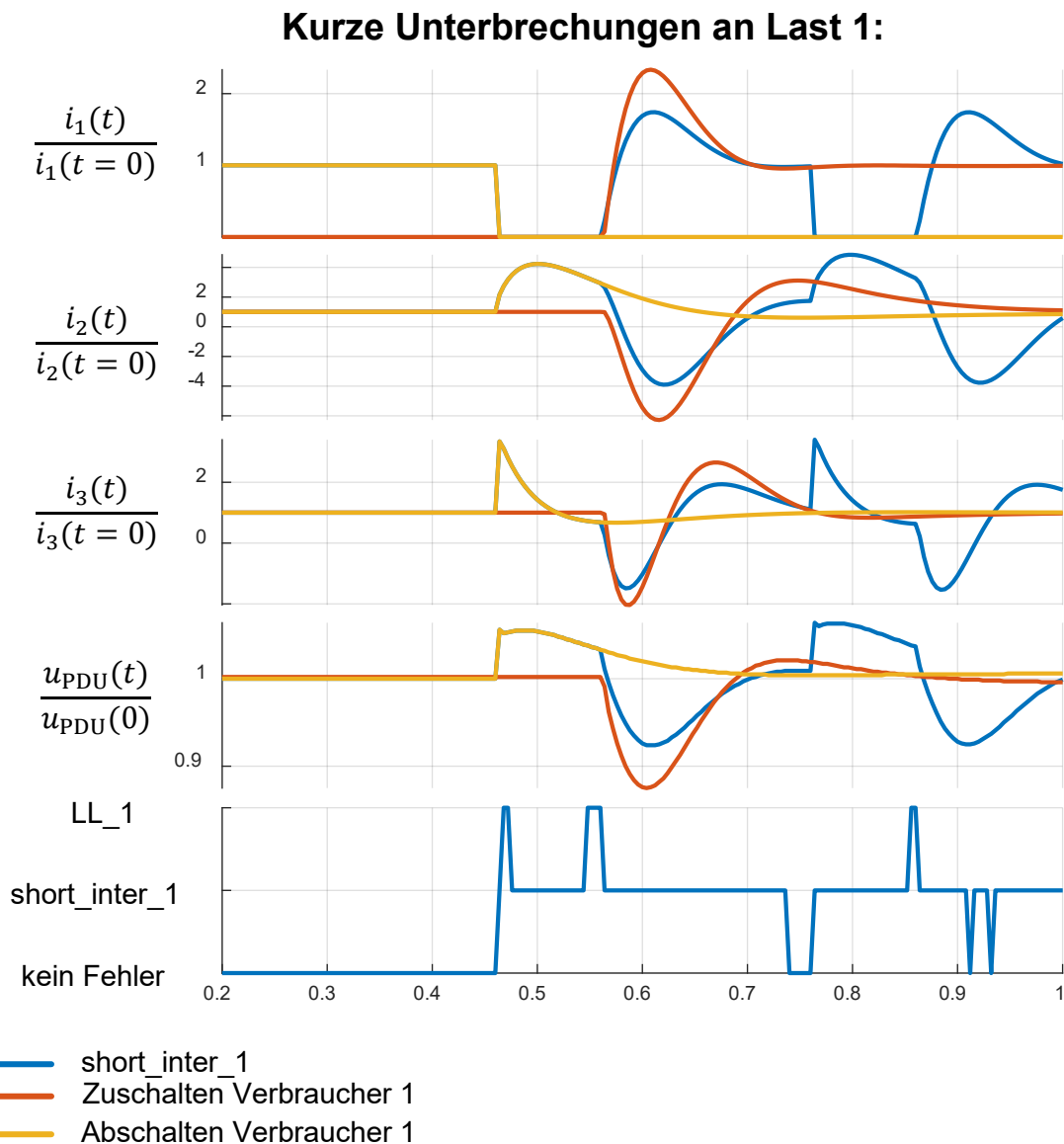


Abbildung 33: Vergleich von kurzen Versorgungsunterbrechungen und dem Zu- und Abschalten von Last 1

Die ersten vier Plots zeigen die übliche Sensorik. Im untersten Plot ist die Auswertung der einzelnen Intervalle mit dem quasikontinuierlichen Ansatz gezeigt. Das Zuschalten des Verbrauchers kann im Vergleich zum Abschalten klar getrennt werden. Die Ausgabe des Netzes schwankt allerdings zwischen Leerlauf, kurzen Unterbrechungen und identifiziert diesen Fehler auch immer mal wieder als einen Nominalbetrieb. Dies ist dadurch bedingt, dass das neuronale Netz bei dem quasikontinuierlichen Ansatz keine Informationen über die Vergangenheit speichern kann und immer nur das aktuell vorliegende Intervall ohne Bezug zum Vorherigen ausgewertet wird. Um die Fehlererkennung zu optimieren, wurde daher die zweite neuronale Netzstruktur aus Abbildung 25 verwendet, um eine kontinuierliche Auswertung der zeitlichen Verläufe zu ermöglichen.

Abbildung 34 zeigt den direkten Vergleich der beiden Methoden.

Fehlerfall „kurze Unterbrechung der Versorgung“ wiederholt sich und kann erst später korrekt vorhergesagt werden

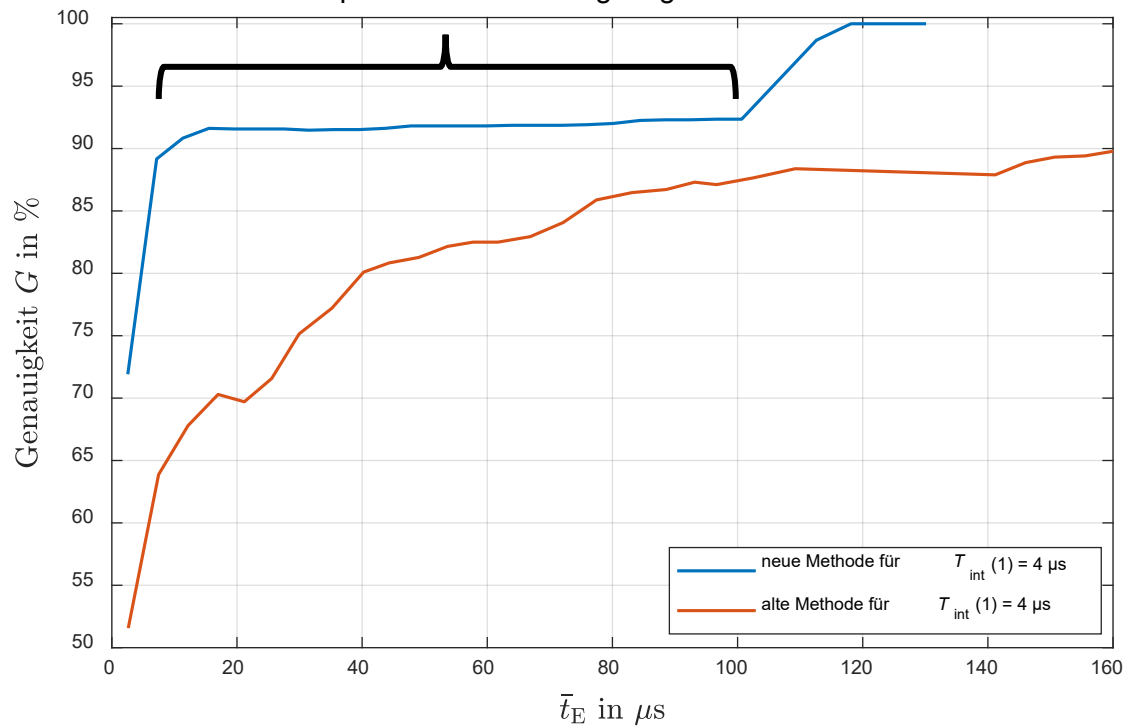


Abbildung 34: Vergleich der untersuchten neuronalen Netze zur Fehlerklassifizierung

Es wird deutlich, dass durch das Hinzufügen der LSTM-Schicht die Diagnosegenauigkeit wieder auf 100 % gebracht werden kann. Während die alte Methode für die periodischen Unterbrechungen ungeeignet war, lässt sich mit dem neuen Netzwerk wieder jeder Fehler im Netz klar erkennen. Bisher wurde das Konzept für die gleichzeitige Erkennung aller Fehler untersucht, jedoch würde sich für jeden Fehler ein anderes Abbruchkriterium ergeben um den Fehler möglichst schnell zu erkennen. Hierfür wurden die optimalen n_A für jeden einzelnen untersuchten Fehlerfall ermittelt und die mittlere Erkennungszeit in Tabelle 2 festgehalten.

Klasse	Minimal notwendiges n_A	Mittlere Erkennungszeit [μs]
KS_1	3	12,87
KS_2	2	7,37
KS_3	2	6,79
LL_1	2	9,88
LL_2	3	14,8
LL_3	3	16,24
PW_to_high	6	37,75

PW_to_low	5	32,26
sc_DCDC	5	27,27
short_inter_1	29	222,09
short_inter_2	28	215,38
short_inter_3	27	207,66
sc_battery_cell	5	28,59
oc_battery_cell_series	36	167,94

Tabelle 2: Optimale durchschnittliche Erkennungszeiten für die einzelnen Fehler

Es zeigt sich, dass sich eine Vielzahl der Fehler bereits sehr schnell erkennen lässt. Die hohe durchschnittliche Erkennungszeit aus Abbildung 34 ergibt sich also hauptsächlich aus den Fehlern, die erst spät erkannt werden können, wie z.B. die kurzen Versorgungsunterbrechungen.

3.6 Analyse der notwendigen Sensorqualität

Das echtzeitkritische Diagnosekonzept zur Erkennung von Kfz-Energiebordnetzfehlern wurde mit den im vorherigen Kapitel dargestellten Sensormodellen untersucht. Hierbei war das Ziel Anforderungen an die notwendige Sensorqualität abzuleiten. Hierfür wurden erneut die zuvor generierten idealen Trainings- und Testdaten manipuliert. Abbildung 35 zeigt den Einfluss der Quantisierungsstufen auf die Genauigkeit.

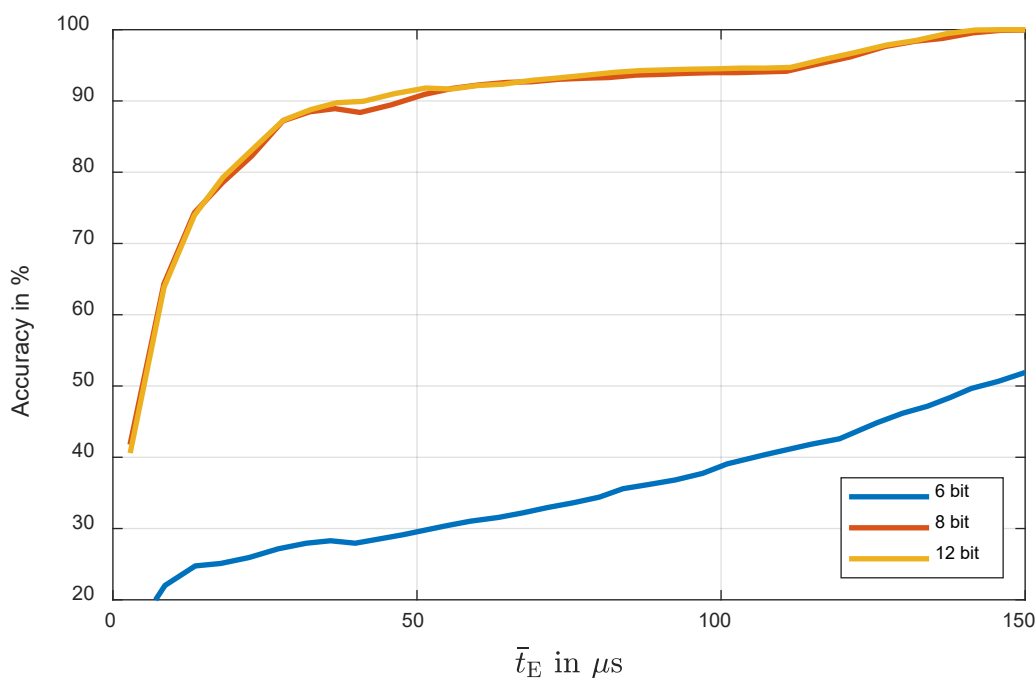


Abbildung 35: Anforderungen an die Quantisierung des Konzepts

Hierbei wurden die Daten für 3 unterschiedliche Quantisierungen ausgewertet. Bei einer Quantisierung von 6-bit kann nur eine sehr geringe Genauigkeit erzielt werden. Diese liegt nur knapp über 50 %. Auffällig ist, dass bei der Auflösung von 8-bit und 12-bit in etwa dieselben Genauigkeiten vorliegen. Eine minimale Auflösung von 8-bit sollte daher zunächst ausreichend für eine genaue Erkennung der Energiebordnetzfehler sein.

Ferner wurden Untersuchungen zu verrauschten Testdaten vorgenommen. Die Trainingsdaten wurden nicht manipuliert, sodass mit den idealen Daten trainiert wurde und danach mit verrauschten Testdaten das trainierte Modell untersucht wurde. Abbildung 36 zeigt einen beispielhaften verrauschten zeitlichen Verlauf eines Stroms im Gesamtbordnetz.

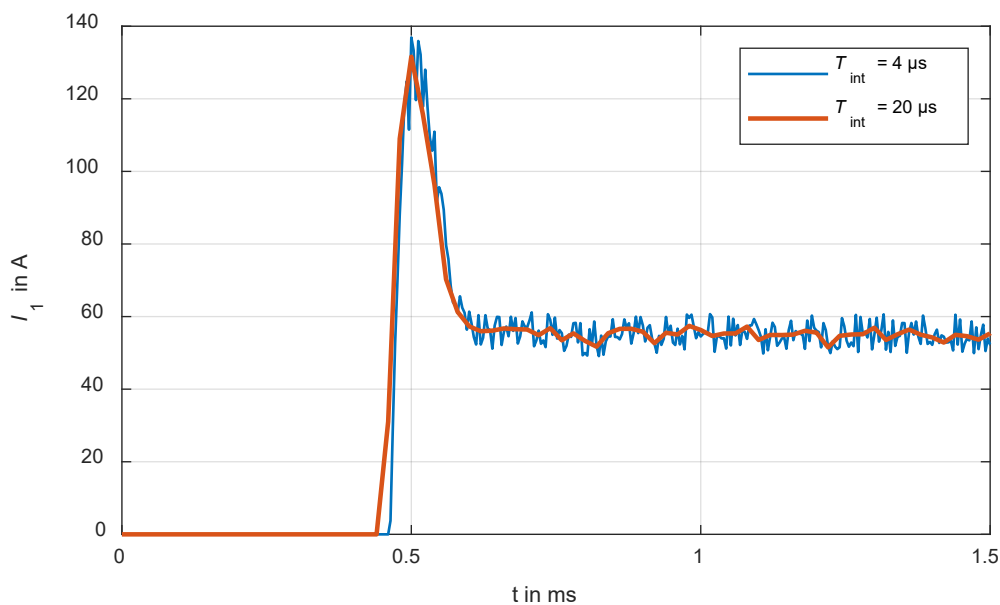


Abbildung 36: Beispiel für 10 % verrauschte Testdaten

Dargestellt sind hier die ursprünglich verrauschten Testdaten bei einer Intervalldauer $T_{\text{int}} = 4 \mu\text{s}$ und $T_{\text{int}} = 20 \mu\text{s}$. Die Intervalldauer von $4 \mu\text{s}$ entspricht der Sample-Rate, sodass hier pro Intervall nur jeweils ein Samplepunkt vorliegt. Diese Daten wurden, wie hier zu sehen, mit zufälligem Rauschen überlagert. Bei einer Intervalldauer von $T_{\text{int}} = 20 \mu\text{s}$ ist bereits wesentlich weniger Rauschen in den Daten zu erkennen. Dies liegt daran, dass nun bei dieser längeren Intervalldauer über 5 Samplepunkte gemittelt werden kann. Dadurch reduziert sich der Rauscheinfluss durch die Mittelwertbildung bei längeren Intervalldauern. Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse für unterschiedliche Intervalldauern bei 10 % verrauschten Daten.

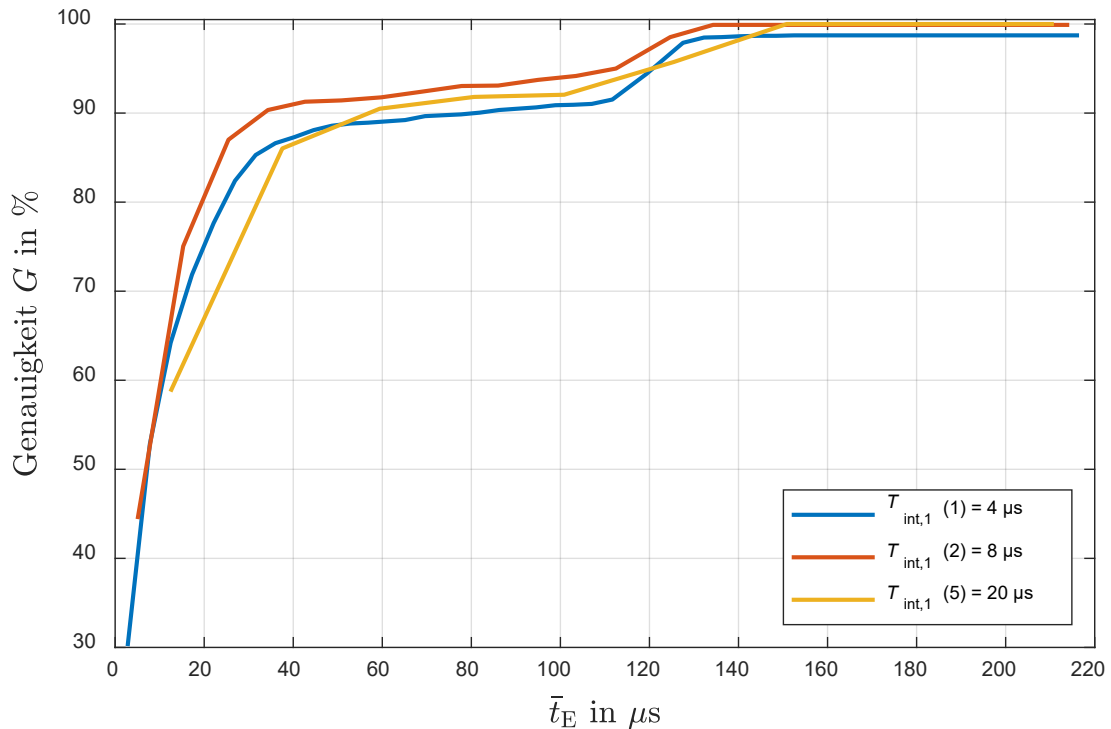


Abbildung 37: Analyse von verrauschen Daten

Es wird deutlich, dass das Modell mit einer Intervalldauer von $4 \mu s$ nicht mehr die Genauigkeit von 100 % erreichen kann, da die Rauscheinflüsse eine korrekte Auswertung verhindern. Bei höheren Intervalldauern reduzieren sich die Rauscheinflüsse durch Mittelwertbildung, sodass bei einer höheren Intervalldauer wieder eine Genauigkeit von 100 % erzielt werden kann. Die durchschnittliche Erkennungszeit wird an dieser Stelle größer, da die Auswertungsintervalle auch größer geworden sind. Somit kann über die Intervalldauer ein Tradeoff zwischen der mittleren Erkennungszeit und der Genauigkeit gefunden werden.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier dargestellten Arbeitspakets wurden zwei Methoden zur Erhöhung der Sicherheit von Kraftfahrzeugen vorgestellt. Die Methoden ermöglichen eine Erkennung von Parametervariationen der Eingangsschutzbeschaltung, sowie eine echtzeitfähige Erkennung von üblichen Kfz-Energiebordnetzfehlern.

Zur Diagnose des Gesamtbordnetzzustands wurden ein zentralisiertes Sensorkonzept in einer Energieverteilereinheit untersucht. Sensormodelle wurden entwickelt, um den Einfluss verschiedener Effekte der Sensorik zu berücksichtigen und die notwendige Sensorqualität für die einzelnen Teilkonzepte zu ermitteln. Beide erarbeiteten Konzepte basieren auf der gleichen Sensorik und nutzen datenbasierte Verfahren zur Diagnose des Energiebordnetzstatus, jedoch handelt es sich bei den einzelnen Konzepten um unterschiedliche Anwendungen. Die Konzepte wurden für einfache Energiebordnetzauslegungen analysiert.

Das Konzept zur Bestimmung der Parameter einer Eingangsschutzbeschaltung basiert auf regelbasierten KI-Verfahren. Durch Messungen in einer Energieverteilereinheit ist es möglich, die Parameter der Eingangsschutzbeschaltung zu bestimmen und eine Aussage zum aktuellen Status des Systems zu treffen. Es wurden zwei unterschiedliche Ansätze analysiert. Einer-

seits wurde die Klassifizierung in feste Kategorien untersucht. Hierbei wurde dann direkt klassifiziert, ob die Eingangsschutzbeschaltung noch in Ordnung ist oder besser ausgetauscht, bzw. überprüft werden müsste. Andererseits wurde auch ein Ansatz verwendet, um direkt die Parameter zu bestimmen. Beide Ansätze eignen sich zur Bestimmung des Status der Eingangsschutzbeschaltung. Die notwendige Sensorqualität konnte bestimmt werden. Es hat sich herausgestellt, dass die Sensorqualität zur korrekten Identifikation des Ersatzserienwiderstands der Kapazität möglichst hoch sein muss, um gute Ergebnisse zu erzielen.

Die zweite Methodik kann in kurzer Zeit transiente Fehler im Energiebordnetz erkennen, klassifizieren und lokalisieren. Hierfür wurde ein Konzept erarbeitet, das verschiedene Designparameter betrachtet, die die Performance beeinflussen können. Die verschiedenen Einflüsse, sowie die Vor- und Nachteile der Designparameter wurden untersucht und herausgearbeitet. Die Methodik war in der Lage, alle untersuchten transienten Energiebordnetzfehler zu 100 % richtig zu erkennen. Mit geeigneter Wahl der Designparameter war dies auch bei einer niedrigen Sensorqualität möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] FAT 334: Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020
- [2] N. Zaman, "Automotive Electronics Design Fundamentals", Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [3] M. Krüger, „Grundlagen der Kraftfahrzeugelektronik“, Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [4] A. El Mejdoubi, A. Oukaour, H. Chaoui, H. Gualous, J. Sabor and Y. Slamani, "Prediction Aging Model for Supercapacitor's Calendar Life in Vehicular Applications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4253-4263, June 2016.
- [5] C. S. Kulkarni, J. R. Celaya, G. Biswas and K. Goebel, "Accelerated aging experiments for capacitor health monitoring and prognostics," 2012 IEEE AUTOTESTCON Proceedings, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 356-361.
- [6] M. Mürken, D. Kübel, A. Kurz, A. Thanheiser and P. Gratzfeld, "Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, UK, 2018, pp. 1-6.
- [7] Wang, H.; Blaabjerg, F.: „Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview“, in: IEEE Transactions on Industry Applications, Band 50, 2014, Ausgabe 5, S. 3569-3578
- [8] ZVEI: „Ausfallraten für Bordnetzkomponenten im Automobil, 2021.
- [9] M. Gerten, M. Rübartsch, S. Frei, "Models of Automotive Power Supply Components for the Transient Analysis of Switching Events and Faults", in AmE 2022 - Automotive meets Electronics; 13th GMM-Symposium, 2022.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Definition einer realistischen Eingangsbeschaltung für unbekannte Kfz-Steuergeräte	- 4 -
Abbildung 2: Definition der Lebensdauerbereiche der spannungsstabilisierenden Eingangskapazität	- 5 -
Abbildung 3: Definition der Lebensdauerbereiche der spannungsstabilisierenden Eingangskapazität	- 6 -
Abbildung 4: Definition der Lebensdauerbereiche der Verpolschutzdiode	- 6 -
Abbildung 5: State of Health einer Leitung bei Belastung mit konstanter Temperatur	- 8 -
Abbildung 6: State of Health einer Leitung bei Belastung mit zeitlich veränderlichem Temperaturprofil	- 8 -
Abbildung 7: Verwendete Sensorik in einer Energieverteilereinheit	- 9 -
Abbildung 8: Untersuchtetes Beispielbordnetz	- 10 -
Abbildung 9: Auswertung der verschiedenen Alterungszustände der Eingangskapazität	- 11 -
Abbildung 10: Nachbildung verschiedener Sample-Raten	- 12 -
Abbildung 11: Nachträgliche Quantisierung der idealen Simulationsdaten	- 13 -
Abbildung 12: Diagnosekonzept zur Bewertung des Status der Eingangsschutzbeschaltung	- 13 -
Abbildung 13: Beispielhafter Klassifizierungsbaum	- 14 -
Abbildung 14: Visualisierung der berechneten Signaleigenschaften	- 15 -
Abbildung 15: Einfacher regelbasierter Ansatz	- 16 -
Abbildung 16: Vergleich des einfachen regelbasierten Ansatzes und der regelbasierten KI-Methode	- 17 -
Abbildung 17: Analyse der Fehlklassifizierungen im Matlab Classification Learner	- 18 -
Abbildung 18: Regression der Parameter der Eingangskapazität mit regelbasierten KI-Verfahren	- 19 -
Abbildung 19: Analyse der Abtastrate und Quantisierung auf die Genauigkeit der Parameterregression	- 20 -
Abbildung 20: Analyse der Abtastrate und Quantisierung auf die Genauigkeit der einzelnen Parameterregressionen	- 20 -
Abbildung 21: Online-Diagnosekonzept für Kfz-Energiebordnetzfehler	- 22 -
Abbildung 22: Beispiel zur Erhöhung der Genauigkeit durch das Abbruchkriterium	- 23 -
Abbildung 23: Bildung des Mittelwertes der Sensordaten als Entscheidungsparameter für das neuronale Netz	- 24 -
Abbildung 24: Bildung des Zuschaltparameters	- 24 -
Abbildung 25: Verwendete Netzstrukturen für die neuronalen Netze	- 25 -
Abbildung 26: Beispielbordnetz zur Untersuchung der Diagnose von Leitungsfehlern	- 26 -
Abbildung 27: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit für Leitungsfehler	- 27 -
Abbildung 28: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit in Abhängigkeit der Intervalldauer	- 27 -
Abbildung 29: Erweitertes Energiebordnetz	- 29 -
Abbildung 30: Analyse der durchschnittlichen Erkennungszeit bei Erweiterung um DC/DC-Wandler Fehler	- 29 -
Abbildung 31: Schaltzustände zur Nachbildung von mehreren kurzen Unterbrechungen der Versorgung	- 30 -

Abbildung 32: Vergleich der kurzen Versorgungsunterbrechungen mit einem Leerlauf einer Leitung - 31 -
Abbildung 33: Vergleich von kurzen Versorgungsunterbrechungen und dem Zu- und Abschalten von Last 1 - 32 -
Abbildung 34: Vergleich der untersuchten neuronalen Netze zur Fehlerklassifizierung ... - 33 -
Abbildung 35: Anforderungen an die Quantisierung des Konzepts - 34 -
Abbildung 36: Beispiel für 10 % verrauschte Testdaten..... - 35 -
Abbildung 37: Analyse von verrauschten Daten - 36 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Komponentenfehlermodelle und Fehlermöglichkeiten - 28 -
Tabelle 2: Optimale durchschnittliche Erkennungszeiten für die einzelnen Fehler - 34 -

Teil 3

Evaluierung der Diagnosefunktion durch virtuelles Testen

Sven Reitz, Thomas Markwirth, Jens Warmuth

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS

1 Einleitung

Aufgrund der Komplexität aktueller und zukünftiger Bordnetzarchitekturen sind zuverlässige, architekturenspezifische Diagnosefunktionen zwingend notwendig, um dem Anspruch von Effizienz bei gleichzeitiger hoher funktionaler Sicherheit gerecht zu werden. Durch die rasant wachsende Elektrifizierung sämtlicher Fahrfunktionen (z.B. Steer-by-Wire, Break-by-Wire, Drive-by-Wire), neue Komfort-Features (z.B. Soft-Close-Funktion), sowie die wachsende Zahl von Fahrerassistenzsystemen und Umfeldsensoren führen zu einer unüberschaubaren Variantenvielfalt möglicher Architekturen des Energie- und Daten-Bordnetzes. Insbesondere im Hinblick auf das automatisierte Fahren steigen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Bordnetzes. Das Bordnetz muss heute nicht nur den Fail-Safe- sondern den Fail-Operational-Betrieb gewährleisten. Die hohen Kosten und das hohe Gewicht des Bordnetzes erfordern hierfür neue, intelligente Sicherheitskonzepte die über eine klassische Mehrfach-Redundanz hinaus gehen. Der Zustand des Bordnetzes muss dazu über der gesamten Lebenszeit des Fahrzeuges beobachtet werden um Fehlerzustände mit geringer Latenz bei möglichst hoher Treffsicherheit zu detektieren und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen einzuleiten.

Die Diagnostik wird dabei selbst zu einem sicherheitskritischen Element des Bordnetzes, deren fehlerfreie Funktion nachgewiesen und sichergestellt werden muss. In AP 3 wird daher auf Basis der beispielhaften Architekturen (AP 1) eine Evaluierung der vorgeschlagenen Diagnosefunktionen (AP 2) mittels virtueller Tests vorgenommen. Die eingesetzte Sensorik und Algorithmen hängt stark von der konkreten Architektur des Bordnetzes ab. Dadurch ergibt sich eine sehr große Variantenvielfalt, welche nur durch den virtuellen Test effizient verifiziert werden kann.

2 Erstellung der Testumgebung auf Basis eines automatisierten Generierungsflows

Definition Beschreibungsformate und automatisierter Import/Export unter Anwendung der Ergebnisse aus AP1 und AP2

Aufgrund der Komplexität moderner und zukünftiger Bordnetzarchitekturen ist ein automatisierter Generierungsflow zur Evaluierung und Optimierung von Diagnosefunktionen zwingend, um dem Anspruch von Effizienz bei gleichzeitiger hoher funktionaler Sicherheit gerecht zu werden. Bei der Generierung über mehrere Stufen eines Flows oder bei hoher Komplexität infolge vieler Import- und Exportfunktionalitäten nutzt man üblicherweise ein Datencontainerformat als "Zwischenspeicher". In diesem lassen sich die Informationen aus verschiedenen Quellen sammeln und dann in beliebige andere Zielformate konvertieren. Für die Bordnetzarchitekturen ist daher ein solcher Datencontainer festzulegen. Die besondere Herausforderung besteht darin, neben der Beschreibung der Architekturen und Lasten auch Fehlerfälle und Diagnosefunktionen des Bordnetzes aufzunehmen, um eine vollständig automatisierte Generierung möglich zu machen.

Aufbauend auf den Untersuchungen im Vorgängerprojekt zu den Kabelbaumaustauschformaten KBL und VEC wurde sich im aktuellen Projekt auf KBL konzentriert, um als Container für die Basistopologie eines Bordnetzes zu dienen. Die Erweiterung des Imports um VEC sollte nicht sehr aufwändig sein, die Formate sind vergleichbar im Aufbau, VEC ist nur entsprechend komplexer. Beide Formate beruhen auf dem XML-Standard.

Kurz zusammenfassend zu KBL: KBL (**K**abel**B**aum**L**iste) ist ein Standard für ein XML-Dateiformat zur einheitlichen digitalen Beschreibung eines Kabelbaums – in Form von Steckern, Leitungen, Leitungsschutzelementen, Befestigungen u. Ä.

Dieser Standard wurde vom VDA als Empfehlung 4964 im Jahre 2005 in der ersten Version veröffentlicht und kontinuierlich weiterentwickelt. Die aktuelle Version ist von Juli 2018. In dieser Aktualisierung wurden die Dokumentation verbessert und neue Features eingeführt. Die letzte Überarbeitung ist die KBL 2.5.

Die Entwicklung der KBL ist von den Anwendern getrieben. In der Projektgruppe „Vehicle Electric Systems Workflow Forum (VES-WF)“ des prostep ivip Vereins sind Mitarbeiter der führenden Automobilhersteller in Deutschland und deren Kabelbaumzulieferer vertreten.

Oggleich eine deutsche Initiative, hat die KBL internationale Beachtung erfahren. Auch im englischen Sprachraum ist der Begriff „Kabelbaumliste“ gebräuchlich. Die Bezeichnung „Harness Description List“ wird weniger verwendet.

Die KBL zielt in Zusammenhang mit der Standardisierung auf den Kabelbaum mit allen Daten und Informationen, die zu seiner Entwicklung und Fertigung benötigt werden. Außerhalb des Kabelbaums liegende Komponenten eines Bordnetzes wie Sensoren, Aktoren und Steuergereäte werden nicht in ihrer Funktion behandelt, sondern als Blackbox.

Die KBL wird in der deutschen Automobilindustrie flächendeckend produktiv für den Datenaustausch zwischen den Herstellern und den Zulieferern genutzt. Die KBL dient auch als Prozessformat in den inhouse-Bordnetzentwicklungsprozessen [1].

Da im KBL bisher keine Daten bzw. Datenstrukturen zu Basistopologien enthalten waren, wurde eine durch die Partner zur Verfügung gestellte KBL-Datei im Rahmen des Projekts um geeignete XML-Bezeichner erweitert:

- <basetopology>
Unter diesem Bezeichner ist die Basistopologie in der KBL-Datei abgelegt.
- <title>
Sprechende Bezeichnung der Basistopologie.
- <nodes>
Die Knoten bzw. Elemente, aus denen die Topologie zusammengesetzt ist.
- <node>
Daten zu einem einzelnen Knoten, beinhaltet einen Kommentar, den Typ, die eindeutige ID sowie die Parameter des Knotens.
- <sources>
Die Quellen, mit denen die zu untersuchenden Topologievarianten verbunden sind.
- <connections>
Sämtliche Verbindungen zwischen den Knoten.
- <connection>
Daten zu einer einzelnen Verbindung, beinhaltet den Typ, eine eindeutige ID, den Start- sowie Endknoten und ebenfalls mögliche Parameter.
- <configuration>
Die Konfigurationsdaten zu allen möglichen Verbindungsleitungen zwischen den PDUs in den Topologievarianten.
- <config>
Die Daten zu jeder einzelnen Verbindungsleitung zwischen den PDUs wie Typ, eine eindeutige ID, Start- und End-PDU sowie die Parameter wie z.B. Drahtlänge und -querschnitt.

Folgender Ausschnitt aus der KBL-Erweiterung zeigt die Datenstruktur beispielhaft.

```
1. <basetopology>
2.   <title>Ak30 test topology</title>
3.   <nodes>
4.     <node>
5.       <type>Generator</type>
6.       <ID>generator1</ID>
7.     </node>
8.   </nodes>
9.   <nodes>
10.    <node comment='Batterie48V'>
11.      <type>Battery</type>
12.      <ID>battery1</ID>
13.      <parameters>
14.        <number_p>2</number_p>
15.        <number_s>24</number_s>
16.      </parameters>
17.    </node>
18.  </nodes>
19.  <nodes>
20.    <node comment='DCDC'>
21.      <type>DCDC_Converter</type>
22.      <ID>DCDC_Converter1</ID>
23.      <parameters>
24.        <Iout_max>200</Iout_max>
25.        <Vin_max>65</Vin_max>
26.        <Vin_min>0</Vin_min>
27.        <Vref>12</Vref>
28.        <control_p>50</control_p>
29.      </parameters>
30.    </node>
31.  </nodes>
32. ...
33. <sources>DCDC_Converter1.p_1</sources>
34. <sources>battery2.p1</sources>
35. ...
36. <connections>
37.   <connection>
38.     <type>wire</type>
39.     <ID>D1</ID>
40.     <startnode>generator1.p1</startnode>
41.     <endnode>pdu5.pin_p</endnode>
42.     <parameters>
43.       <df_wire_cross_section>2.5</df_wire_cross_section>
44.       <df_wire_length>0.5</df_wire_length>
45.     </parameters>
46.   </connection>
47. </connections>
48. <connections>
49.   <connection>
50.     <type>wire</type>
51.     <ID>D2</ID>
52.     <startnode>DCDC_Converter1.p_h</startnode>
53.     <endnode>pdu5.pin_p4</endnode>
54.     <parameters>
55.       <df_wire_cross_section>2.5</df_wire_cross_section>
56.       <df_wire_length>0.5</df_wire_length>
57.     </parameters>
58.   </connection>
59. </connections>
60. ...
61. <configuration>
62.   <config>
63.     <type>pdu_wire_connect</type>
```

```

64.     <ID>CFG1</ID>
65.     <from>1</from>
66.     <to>2</to>
67.     <params>
68.         <wire_cross_section>16.0</wire_cross_section>
69.         <wire_length>3.0</wire_length>
70.     </params>
71. </config>
72. </configuration>
73. <configuration>
74.   <config>
75.     <type>pdu_wire_connect</type>
76.     <ID>CFG2</ID>
77.     <from>1</from>
78.     <to>3</to>
79.     <params>
80.       <wire_cross_section>16.0</wire_cross_section>
81.       <wire_length>1.0</wire_length>
82.     </params>
83.   </config>
84. </configuration>
85. ...
86. </basetopology>

```

Im Vorgängerprojekt wurden die Grundtopologien aus einem eigenen JSON-Format [2] importiert. Diese Importroutinen wurden weiterentwickelt und die Funktionalität um das Lesen von XML-Formaten erweitert, auf welches die KBL-Dateien aufbauen. Die Grundtopologie konnte nun erfolgreich aus der KBL-Datei gelesen werden.

Wie bereits zuvor, wurden die zu untersuchenden Topologievarianten durch den Projektpartner TU Kassel in Matlab definiert und stehen somit als Matlab-Savefile zur Verfügung. Folgendes Bild zeigt einen ausgewählten Bereich mit der Topologievariante 3500 von 8192 definierten Varianten in dieser Datei.

Fields	arch	G	Bok_Anz_Fehler	Bok_Anz_VersBoxen	Bok_VersBoxen	BBK_Anz_Fehler	BBK_Anz_VersBoxen	BBK_VersBoxen	BBO_Anz_Fehler	BBO_Anz_VersBoxen	BBO_VersBoxen
3493	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 2 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x5 double
3494	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 2]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1 1]	[4 4 4 4]	4x4 double
3495	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1]	[4 4 4]	4x3 double
3496	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	2	4	[1; 1; 1; 1]	[1 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]
3497	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 1 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x4 double
3498	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1]	[4 4 4]	4x3 double
3499	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 1 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x4 double
3500	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1]	[4 4 4]	4x3 double
3501	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 2 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x5 double
3502	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[2 2]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1 1]	[4 4 4 4]	4x4 double
3503	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[2 3 3 3]	4x4 double	[2 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1]	[4 4 4]	4x3 double
3504	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[2 3 3 3]	4x4 double	2	4	[1; 1; 1; 1]	[1 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]
3505	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 1 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x5 double
3506	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x4 double
3507	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 1 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x5 double
3508	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 1]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1 1]	[4 4 4 4 4]	4x4 double
3509	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 2 1]	[4 4 4]	4x3 double	[1 1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4 4]	4x6 double
3510	1x1 struct	1	[1 1 1 1]	[3 3 3 3]	4x4 double	[3 2]	[4 4]	[1 1; 1; 1; 1; 1]	[1 1 1 1 1]	[4 4 4 4 4 4]	4x5 double

Abbildung 1: Matlab-Savefile mit Topologievarianten

In Matlab lässt sich der Aufbau dieser Topologievariante ausgeben:

```

1. >> Top_sB_nF(3500).arch
2.
3. ans =
4.
5. struct with fields:
6.
7.   AnzQ: 2
8.   AnzB: 4
9.   PQ: {[1] [1]}
10.  sVB: {[2 3 4] [5] [4]}
11.  BBB: {[3 4] [4] [5]}

```



```

12.     sVS: {[2 2 2] [5] [2]}
13.     sB: [1 1 1 1]

```

Die Bedeutung der einzelnen Bezeichner und deren Inhalte wurden durch die TU Kassel festgelegt und dokumentiert. Unter anderem sind dies die Verschaltung der Quellen mit den PDUs, die Backbones, einseitig, zweiseitig und nicht schaltbaren Verbindungen zwischen den PDUs. Diese Daten werden für sämtlich zu untersuchenden Topologievarianten durch Importroutinen in Python gelesen, geparsed und zusammen mit den Daten der Grundtopologie in das interne Zwischenformat im Speicher abgelegt. Falls gewünscht, kann die Struktur für spätere Betrachtungen abgespeichert werden, normalerweise wird sie im Speicher gehalten, um eine sehr schnelle Modellgenerierung zu ermöglichen.

Basis hierbei bildet ein Beschreibungsformat, das ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich der Beschreibung und Konfiguration komplexer Bordnetze bietet. In den vorherigen Projekten hatte sich das JSON-Format zur neutralen Ablage von Grundtopologien bewährt. Es bot sich an, daran anzuknüpfen und um Bezeichner für die Ablage der Topologievarianten zu erweitern. Im Folgenden ist ein Ausschnitt der JSON-Datei mit Grundtopologie und den Topologievarianten 3500 und 3501 zu sehen.

Unter dem Bezeichner "basetopology" ist die Basistopologie abgelegt. Dieser Abschnitt wurde bereits im Abschlussbericht des Vorgängerprojekts ausführlich beschrieben. Der neue Bezeichner "topologies" nimmt nun die Topologievarianten als Array auf, welche selbst jeweils unter dem Bezeichner "topologie" stehen. Jede Topologie hat wiederum ihren Index aus dem Matlab-Savefile von der TU Kassel als "id", dann folgen die Verbindungen der Quellen mit ihren PDUs unter "sourcecons" sowie die Verbindungen der PDUs untereinander unter "pducons". Jeder Eintrag unter beiden Bezeichnern hat wie bei der Grundtopologie einen Typ, eine Id, Start- und Endknoten sowie Parameter wie Leitungslänge und -durchmesser.

```

1.  {
2.    "basetopology": {
3.      "title": "Ak30 test topology",
4.      "nodes": [
5.        {
6.          "node": {
7.            ...
8.          },
9.        },
10.     ...
11.   ],
12.   "sources": [
13.     "DCDC_Converter1.p_1",
14.     "battery2.p1"
15.   ],
16.   "connections": [
17.     {
18.       "connection": {
19.         ...
20.       },
21.     },
22.     ...
23.   ],
24.   "configuration": [
25.     {
26.       "config": {
27.         ...
28.       },
29.     },

```

```

30. ...
31.     ],
32.     "pdus_in_topologie": 4
33.   },
34.   "topologies": [
35.     {
36.       "topologie": {
37.         "id": "3500",
38.         "sourcecons": [
39.           {
40.             "connection": {
41.               "type": "wire",
42.               "ID": "TD1",
43.               "startnode": "DCDC_Converter1.p_1",
44.               "endnode": "pdu1.sv1",
45.               "parameters": {
46.                 "df_wire_cross_section": 2.5,
47.                 "df_wire_length": 0.5
48.               }
49.             }
50.           },
51. ...
52.         ],
53.         "pducons": [
54.           {
55.             "connection": {
56.               "type": "switch_two_conn",
57.               "ID": "SW2C1",
58.               "startnode": "pdu1.pin_p2",
59.               "endnode": "pdu2.pin_p2",
60.               "parameters": {
61.                 "df_wire_cross_section": 16.0,
62.                 "df_wire_length": 3.0
63.               }
64.             }
65.           },
66. ...
67.         ]
68.       }
69.     },
70.     {
71.       "topologie": {
72.         "id": "3501",
73.         "sourcecons": [
74.           {
75.             "connection": {
76.               "type": "wire",
77.               "ID": "TD1",
78.               "startnode": "DCDC_Converter1.p_1",
79.               "endnode": "pdu1.pin_p0",
80.               "parameters": {
81.                 "df_wire_cross_section": 2.5,
82.                 "df_wire_length": 0.5
83.               }
84.             }
85.           },
86. ...
87.         ]
88.       }
89.     }
90.   ]
91. }

```

Die benötigten Importfunktionalitäten für das Einlesen der Basistopologie aus einer KBL-Datei im XML-Format sowie der Topologievarianten aus einem Matlab-Savefile wurden geschaffen

bzw. erweitert. Als Datencontainer wurde auf das bewährte JSON-Format zurückgegriffen und dies für die Ablage der zu untersuchenden Topologievarianten erweitert. Der Datencontainer wird im Speicher gehalten, kann aber ebenso exportiert werden.

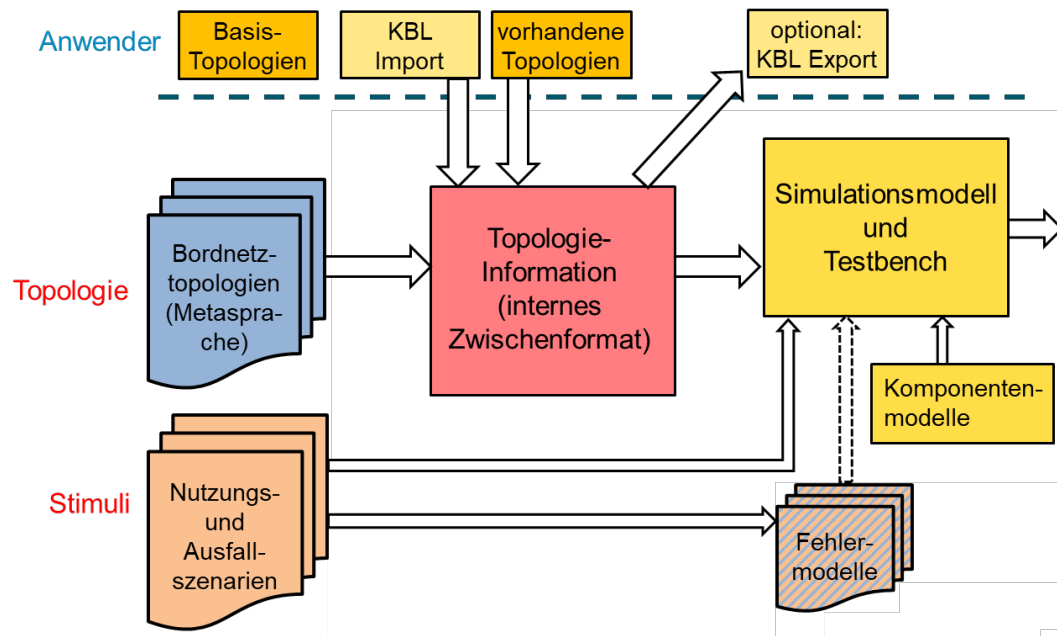


Abbildung 2: Austauschformate und Schnittstellen – oben: Basistopologie im KBL-Format, links: Topologievarianten im Matlabformat, Mitte: JSON als internes Zwischenformat, unten und rechts: Export der Topologiedaten, Fehler-szenarien und Komponentenmodelle in ein Simulationsmodell mit Testbench zur Regression

Definition der Simulationsumgebung unter Anwendung existierender Modelle und Erstellung fehlender Modelle für grundlegende Systemkomponenten

Auf Basis der in AP1 festgelegten Architekturen und der Anwendung der in den Vorprojekten erstellten Modellbibliotheken, sind die jeweiligen Simulationsmodelle automatisiert zu generieren. Fehlende Komponentenmodelle sind zu implementieren bzw. zu importieren. Zusätzlich wird eine konfigurierbare Cloud-basierte Simulationsumgebung erstellt, die ein vollständig automatisiertes Regressions-Testen der Diagnosefunktionen ermöglicht.

In den vorherigen Projekten wurde OpenModelica zur Simulation des aktuellen Modells des Basisbordnetzes eingesetzt. Wurden Fehler wie Open oder Short aktiviert, so führte es sofort zum Abbruch der Simulation, numerische Probleme traten auf. Anpassungen an den Solverparametern brachte keine Lösung. OpenModelica ist leider bekannt für numerische Probleme und langes Kompilieren vor jedem Simulationslauf. Projektpartner nutzten Spice für die Untersuchung schneller detaillierter Schaltvorgänge oder stiegen auf SimScape von Matlab um. SimulationX ist nur für Windows verfügbar und erlaubt keine Parallelausführung. Dymola als Modelica-Simulator wurde nicht weiter untersucht. Seitens EAS wurde SystemC AMS präferiert, die Fehlerinjektion zur Laufzeit der Simulation ohne Neukompilierung des Modells wurde bereits in anderen Projekten implementiert, der erzeugte Code benötigt keine Lizenzen, ist sehr schnell und kann beliebig skaliert im Cluster laufen.

Kurz zu SystemC AMS: SystemC ist eine Hardwarebeschreibungssprache welche auf der Programmiersprache C++ aufbaut. Somit ist SystemC eine Definition von C++ Klassen und Funktionen welche die Beschreibung der Struktur und des Verhaltens von Hardwarekomponenten erlauben. SystemC wird von der Accellera Systems Initiative – einer Industrievereinigung – entwickelt und standardisiert. SystemC ist ein IEEE Standard (IEEE 1666). Der Fokus von SystemC liegt in der Beschreibung von komplexen digitalen Hard-/Softwaresystemen auf höheren Abstraktionsebenen. SystemC AMS – ebenfalls IEEE standardisiert (IEEE 1666_1) – erweitert SystemC mit der Möglichkeit analoges und gemischt analog/digitales Verhalten auf hohen Abstraktionsebenen zu beschreiben. Ziel ist es, die Beschreibung und Simulation des Gesamtsystems bestehend aus analoger und digitaler Hard- und Software in seiner Umgebung zu ermöglichen. Dabei sollen komplette Anwendungsszenarien mit sinnvollem Aufwand simulierbar sein. Damit ist der Hauptanwendungsbereich von SystemC/ SystemC AMS die Erstellung einer ausführbaren Spezifikation, der Architekturentwurf und die Bereitstellung eines Referenzmodells zur Stimulierung und Überprüfung von implementierten Komponenten. Um vor allem die erforderliche Simulationsgeschwindigkeit zu erreichen, setzt SystemC/ SystemC AMS auf das Konzept von verschiedenen sogenannten Berechnungsmodellen (Models of Computation - MoC). Dabei ist die Idee, dass die unterschiedlichen Systemkomponenten mit dem für sie besten Beschreibungsmittel hinsichtlich Aufwand, erforderlicher Genauigkeit und Simulationsgeschwindigkeit beschrieben werden und damit dann mit optimierten Algorithmen berechnet werden können. Damit lässt sich für Systemebenenbetrachtungen eine Beschleunigung der Simulation um mehrere Größenordnungen im Vergleich zu konventionellen Verhaltensbeschreibungssprachen erreichen. Dadurch wird eine funktionale Gesamtsystemsimulation von komplexen Anwendungsszenarien möglich [2].

Sämtliche Modelle aus der bisherigen Modellbibliothek konnten dank der grafischen Oberfläche von Coside (integrierte Entwurfsumgebung für SystemC und SystemC AMS) schnell und effizient nach SystemC AMS übertragen werden. Lasten und Leitungen wurden so erweitert, dass über Strom- und Spannungsmessung die Verlustleistungen bestimmt werden können und als Größe „power“ zugreifbar sind.

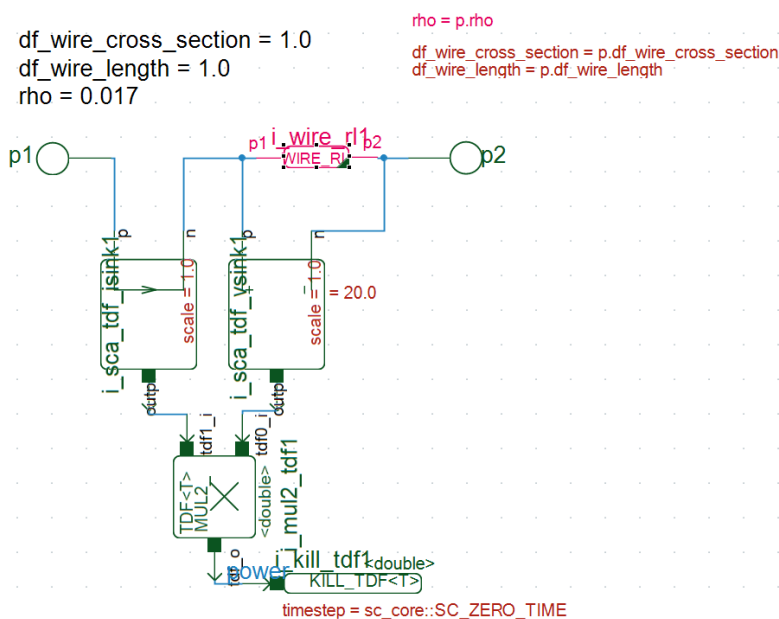


Abbildung 3: SystemC AMS-Modell einer RL-Leitung mit Bestimmung der Verlustleistung

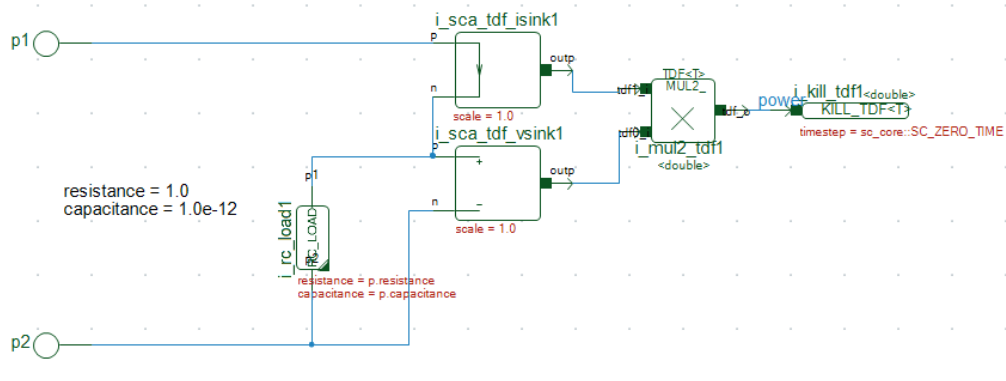


Abbildung 4: SystemC AMS-Modell einer RC-Last mit Bestimmung der Verlustleistung

Da keine Modelle von eFuses bzw. der Logik der PDUs zur Verfügung standen, wurden thermische Sicherungen modelliert, welche nach einer Verzögerungszeit bei Überschreiten eines Maximalstroms „durchbrennen“.

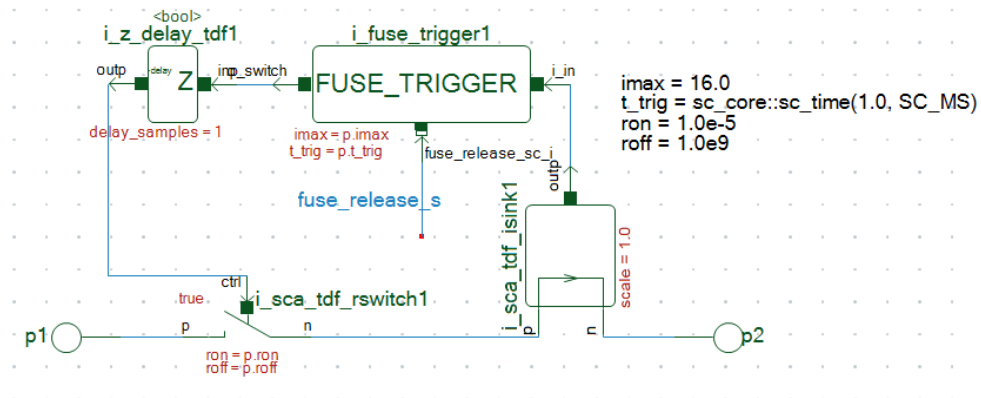


Abbildung 5: SystemC-AMS Modell einer Sicherung mit Auslösestrom, Verzögerungszeit sowie Ron- und Roff-Widerstandswerten

Nachfolgend das Modell der PDU mit sämtlichen Sicherungen, Schaltern und Strommesssignalen. Damit bei einem Kurzschluss an z.B. einer Last nicht sämtliche thermischen Sicherungen im Strompfad auslösen, wurde die Verzögerungszeit der Sicherungen an den Pins für die Lasten auf 1ms gesetzt, die der normalen Verbindungen zwischen den PDUs auf 2ms und die Sicherungen an den Backboneanschlüssen sind auf 3ms gesetzt. So wird erzwungen, dass zuerst die Lastsicherungen auslösen, dann bei Bedarf die der normalen Verbindungen und zuletzt die an den Backbones.

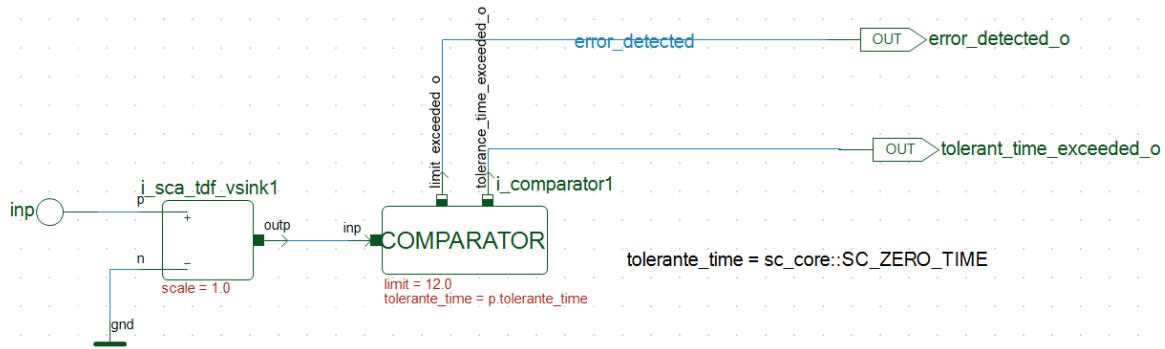


Abbildung 7: SystemC AMS-Modell der Fehlererkennung

Folgende Abbildung zeigt die Grundtopologie, wie sie automatisch aus den Daten der Containerdatei erzeugt wird. Ebenso sind die Quellen und die Lasten mit dem Modell der Topologieauswahl automatisch verschaltet. Diese Darstellung wurde allerdings zur Illustration „nachgezeichnet“, da die generierten Verschaltungen keine grafische Repräsentation haben.

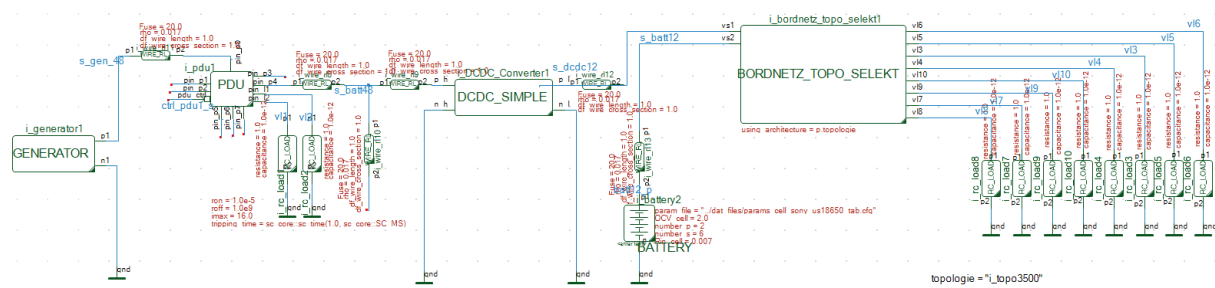


Abbildung 8: Modell der Grundtopologie mit angeschlossenen Lasten sowie Topologieauswahl

Von großem Nutzen ist das Modell zur Topologieauswahl. Nachfolgendes Bild zeigt es exemplarisch für 2 Topologien. Dieses Modell wird automatisch generiert und ermöglicht es, beliebig viele Topologievarianten im Modell zu haben und diese einfach durch den Parameter "using_architecture" auszuwählen. Dabei wird auch nur diese eine ausgewählte Topologie während der Simulation im Speicher gehalten und nicht die maximale Gesamtzahl von 8192 in der aktuellen Matlabdatei der TU Kassel.

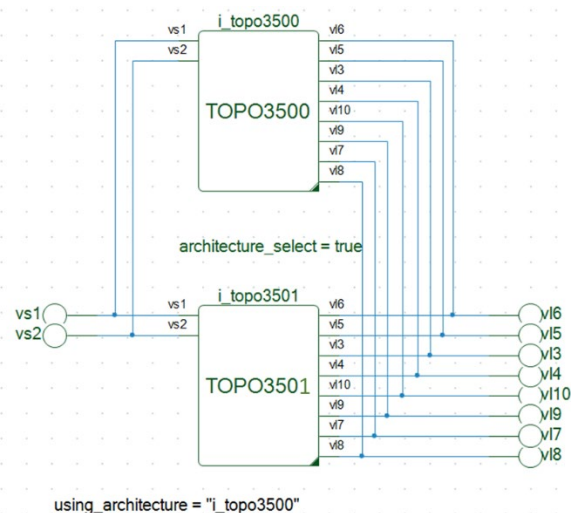


Abbildung 9: Modell der Topologieauswahl am Beispiel der Topologievarianten 3500 und 3501

Die Modellgenerierung für SystemC AMS ist komplexer als für Modelica oder Spice. Dies ist in der Natur von SystemC AMS begründet. Es ist direkt kompilierbarer C++-Code für jedes Modell und Netzliste zu generieren mit Constructor, Destructor und sämtlichen für den Compiler und Solver notwendigen Methoden. Der Pythoncode zur Modellgenerierung wurde entsprechend angepasst und erweitert.

Um nicht wie im vorigen Projekt direkt den Pythoncode aufrufen und entsprechende Variablen zu den Pfaden, Inputdateien, zu untersuchenden Topologien usw. im Vorfeld händisch setzen zu müssen, wurde eine grafische Benutzeroberfläche in tkinter, einem Pythonmodul, erstellt.

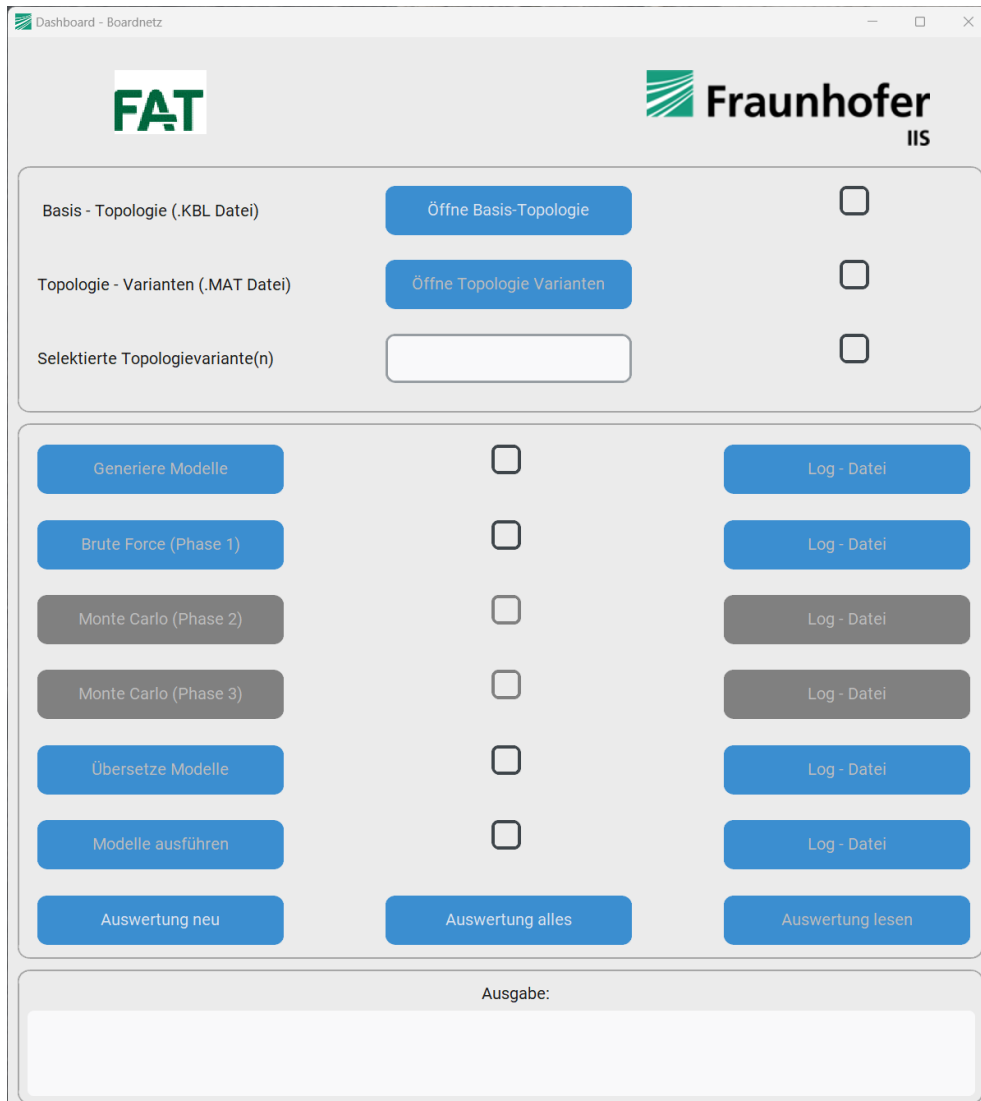


Abbildung 10: Grafische Oberfläche zur automatisierten Modellgenerierung und Simulation

Zuerst ist nur die Auswahl einer Basistopologie möglich, die restlichen Buttons sind deaktiviert, da jede weitere Aktion immer die Aktionen vor ihr bedingen. Ist die KBL-Datei mit der Basistopologie über einen Auswahldialog (siehe Bild) selektiert, so wird sie geparsed und bei einem vorhandenen und gültigen Abschnitt zu einer Basistopologie der nächste Button zur Auswahl einer Matlabdatei mit Topologievarianten aktiviert. Diese Auswahl erfolgt analog zur KBL-Datei. Treten Importfehler auf, so wird dies in der unteren Ausgabeconsole ersichtlich.

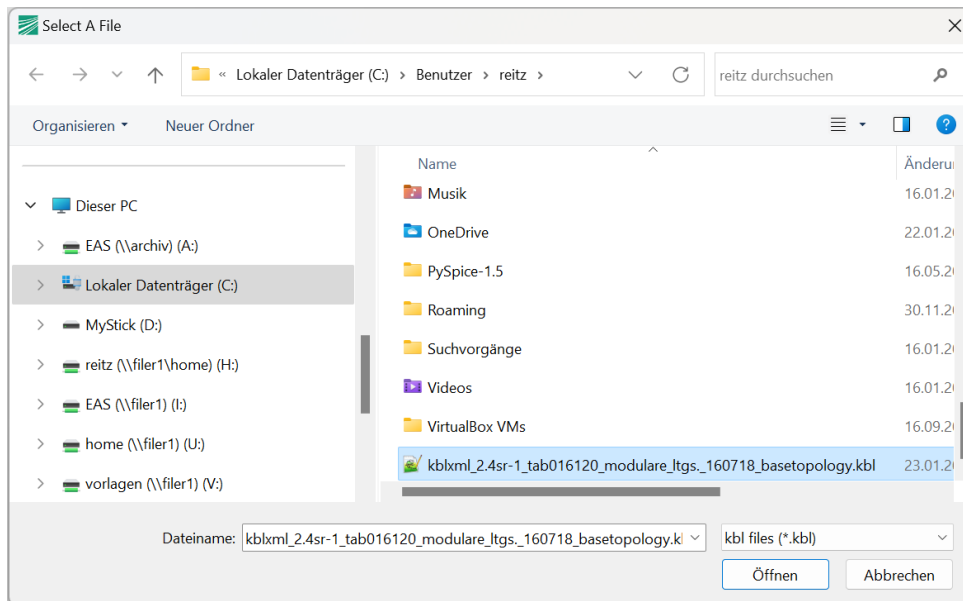


Abbildung 11: Auswahldialog für eine KBL-Datei mit der Basistopologie

Anhand der eingelesenen Anzahl an Topologievarianten kann der Nutzer im Eingabefeld angeben, welche dieser Topologien er untersuchen möchte. Eine mögliche Eingabevariante ist z.B.: 1-300,3500,3501,8000. Dies bedeutet: Untersuche die Topologien 1 bis 300 sowie die Topologien 3500, 3501 sowie 8000. Nach dieser (gültigen) Eingabe wird der Button zur Modellgenerierung aktiv. Wählt man ihn aus, so werden sämtlicher SystemC AMS-Code für die Grundtopologie, die ausgewählten Topologievarianten sowie der Topologieauswahl generiert und im Filesystem abgelegt. Im nächsten Schritt werden die Fehlerfälle und deren Betrachtung ausgewählt. Aktuell ist Brute Force möglich, auf die beiden Monte Carlo-Varianten kann später erweitert werden. Dieser Punkt wird im nächsten Kapitel betrachtet.

Ist dies geschehen, so stehen sämtliche Daten und C++-Modelle zur Übersetzung bereit und werden in ausführbaren Code gewandelt. Folgendes Bild zeigt die Ausgaben des Make-Prozesses.

```

CXX    bordnetz/fuse.cpp
CXX    bordnetz/fuse_trigger.cpp
CXX    bordnetz/generator.cpp
CXX    bordnetz/battery.cpp
CXX    bordnetz/rc_load.cpp
CXX    bordnetz/wire_rl.cpp
CXX    bordnetz/pdu.cpp
CXX    bordnetz/dcdc_simple.cpp
CXX    bordnetz/globals.cpp
CXX    bordnetz/comparator.cpp
CXX    bordnetz/comparator_eln.cpp
CXX    bordnetz/my_and.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_topo_selekt.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_stim_t1.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_stim_regression.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_stim_fault_sim1.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen.cpp
CXX    bordnetz/wire_rl_p.cpp
CXX    bordnetz/rc_load_p.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_topo_3500.cpp
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_topo_3501.cpp
CP     DEBUG/bordnetz/regression.par
CP     DEBUG/bordnetz/i_topo3500_faults.cfg
CP     DEBUG/bordnetz/i_topo3501_faults.cfg
CXX    bordnetz/bordnetz_demo_gen_generic_tb.cpp
AR     DEBUG/lib-mingw-w64/libfat_bordnetz.a
CXXLD  DEBUG/bordnetz/bordnetz_demo_gen_generic_tb.exe      (static linking)
    
```

Abbildung 12: Ausgaben des Make-Prozesses zur Erzeugung eines ausführbaren SystemC-AMS-Codes des Bordnetzes

Nun ist der Button „Modelle ausführen“ aktiviert und die Simulationen können damit lokal oder im Cluster gestartet werden. Dabei werden entsprechend der generierten Daten in den Dateien regression.par und den Dateien i_topo_3500.cfg und i_topo_3501.cfg (siehe nächstes Kapitel) sämtliche Topologien und Fehlerfälle komplett im Zeitbereich simuliert.

Abschließend ist die Auswertung möglich. Es kann gewählt werden, ob nur neu hinzugekommene Simulationsergebnisse, sämtliche Simulationsdaten komplett neu oder nur bereits ausgewertete Simulationen ausgelesen werden sollen. Sämtliche Simulationsdaten auszuwerten könnte sehr zeitaufwändig sein und macht nur Sinn, wenn Änderungen an den Auswertelgorithmen erfolgten.

3 Evaluierung und Optimierung der Diagnosekonzepte

Generierung von Testcases für die Simulation und Einbindung in Regression

Für die Evaluierung der Diagnosefunktionen sind verschiedenste Testcases auf Basis bspw. von Last-Szenarien, zu erwartenden Fehlerfällen oder vordefinierten Erkennungsraten entsprechend der Komplexität der jeweiligen Architektur zu definieren und automatisiert zu implementieren. Diese Testcases werden dann für die simulative Evaluierung in der o.g. automatischen Regression angewendet. Dies beinhaltet die Erfassung der Ergebnisse aller Simulationen und der Gesamtübersicht über die Erfüllung der Testziele.

Durch eine automatisierte Aktivierung der Regression ist insbesondere nach Änderungen in der Architektur oder der Diagnosefunktionen, eine Aussage über die Wirksamkeit und funktionalen Sicherheit der verschiedenen Diagnosefunktionen zu jeder Zeit gegeben.

Mit Hilfe des im letzten Kapitel beschriebenen Generierungsflows und der Simulationsumgebung können Diagnosefunktionen und Testcases automatisiert untersucht werden und die beste bzw. die geeignetsten Topologien entsprechend der nachfolgenden Abbildung ermittelt werden.

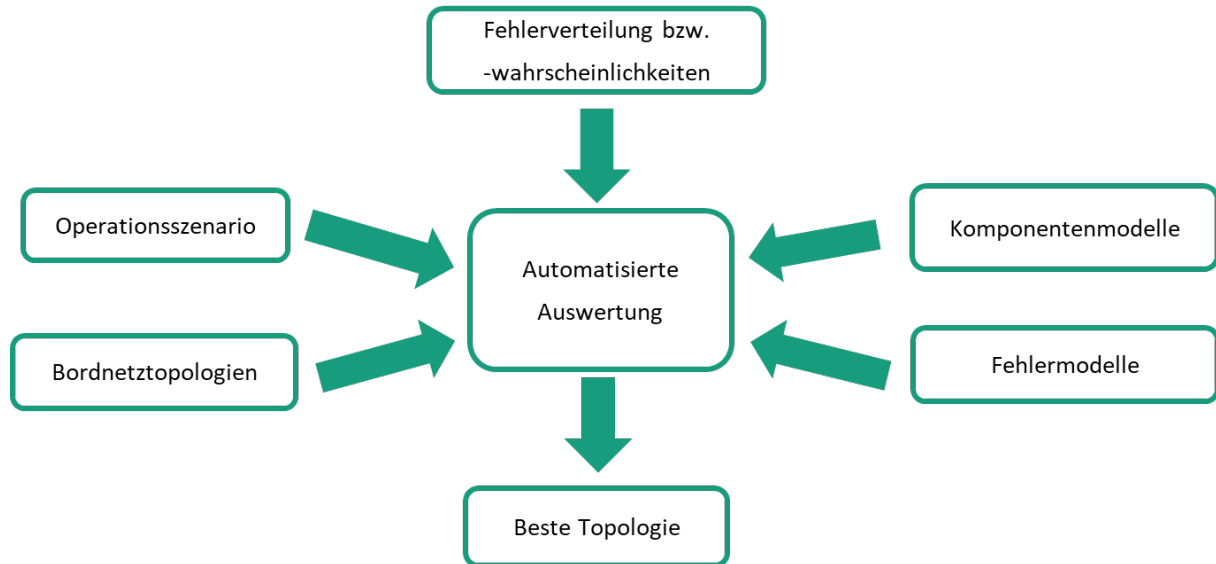


Abbildung 13: Automatisierte Ermittlung der besten Topologievariante entsprechend vorgegebener Kriterien

Aus den Operationsszenarien bzw. Mission-Profilen lassen sich die Fehlerverteilung und -wahrscheinlichkeiten bestimmen. Hierzu wurden 3 verschiedene Phasen geplant:

- Phase 1 – Brute Force
 - Jeder Fehler in jeder Kombination
 - Fehlerliste: Konfigurationsdatei mit zu testenden Fehlern
- Phase 2 – Monte Carlo:
 - Fehlerwahrscheinlichkeiten nach Fehlerart einstellbar
 - Fehlerwahrscheinlichkeiten nach Komponente einstellbar
 - Fehlerliste: Konfigurationsdatei mit zu testenden Fehlern und Wahrscheinlichkeiten
 - Konfidenzintervall einstellbar
- Phase 3 – Monte Carlo:
 - Fehlerwahrscheinlichkeiten aus Mission-Profilen bestimmen

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde Phase 1 umgesetzt. In jede elektrische Verbindung innerhalb einer Topologievariante wurden automatisch Leitungsbrüche (open) und Kurzschlüsse gegen Masse (short) während der Simulationsläufe injiziert. Dazu wird für jede Topologievariante eine Fehlerbeschreibungdatei durch Druck auf den Button „Brute Force“ in der Oberfläche erzeugt. Im Hintergrund wird jedes elektrische Netz in der Topologie ermittelt, sämtliche Ports der mit jedem einzelnen Netz verbundenen Modellinstanzen aufgelistet und für jeden Port ein Fehler des Typs open bzw. short in der Fehlerbeschreibungdatei abgelegt. Folgender Ausschnitt zeigt den Aufbau einer solchen Datei.

```
1. //  
2. //0 n pdu1 pin_p0: i_pdu1.pin_p0, i_sca_topo_r1.n, i_sca_topo_r2.n
```

```
3. FAULT_MODEL FAULT_OPEN_CONNECTION
4. TARGETS {"*i_pdu1.pin_p0"}
5. SET_MEAN_TIME 100 ms
6. SET_DURATION 5000 ms
7. //1
8. FAULT_MODEL FAULT_OPEN_CONNECTION
9. TARGETS {"*i_sca_topo_r1.n"}
10. SET_MEAN_TIME 100 ms
11. SET_DURATION 5000 ms
12. ...
13.
14. //
15. //27 n_pdu1_pin_p0: i_pdu1.pin_p0, i_sca_topo_r1.n, i_sca_topo_r2.n
16. FAULT_MODEL FAULT_SHORT_CONNECTION
17. TARGETS {"*i_pdu1.pin_p0"}
18. SOURCES {"gnd"}
19. SET_MEAN_TIME 100 ms
20. SET_DURATION 5000 ms
21. SET_DURATION 5000 ms
22. ...
```

// sind Kommentarzeilen. Es sind zwei Leitungsbrüche an den Ports `i_pdu1.pin_p0` sowie `i_sca_topo_r1.n` definiert und ein Kurzschluss an Port `i_pdu1.pin_p0` gegen `gnd`. Die Fehler werden bei 100 ms aktiviert und dauern 5 s an. Da für jeden einzelnen Fehler Einzelsimulationen mit einer Endzeit von 500 ms initiiert werden, wirken die Fehler nicht gleichzeitig und halten auch bis zum Simulationsende an. Es sind noch weitere Schlüsselwörter verfügbar, wie z.B. für Fehlerverteilungen oder -wahrscheinlichkeiten, diese sind in Phase 1 jedoch nicht notwendig.

Diese Fehlerbeschreibungen werden für jede zu untersuchende Topologievariante erzeugt. Die Datei `regression.par` steuert die vollständige Regression, d.h. sie gibt vor, welche der im generierten, ausführbaren Code enthaltenen Topologievarianten simuliert werden sollen und welche der definierten Fehlerfälle sind in diese Varianten während der Laufzeit zu injizieren. Ein Minimalbeispiel ist hier zu sehen. Der Bezeichner „topologie“ enthält die Liste der zu untersuchenden Topologien, dann gibt es pro Topologie einen Bezeichner mit der Liste der zu injizierenden Fehler. In Topologie 3500 werden hier z.B. 67 Fehler injiziert, in Topologie 3501 sind es 63.

```
1. topologie = {i_topo3500,i_topo3501}
2. i_topo3500_faults =
   {f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13, f14, f15, f16, f17, f18, f19, f20, f21, f22, f23, f24, f25, f26, f27, f28, f29, f30, f31, f32, f33, f34, f35, f36, f37, f38, f39, f40, f41, f42, f43, f44, f45, f46, f47, f48, f49, f50, f51, f52, f53, f54, f55, f56, f57, f58, f59, f60, f61, f62, f63, f64, f65, f66, f67}
3. i_topo3501_faults =
   {f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13, f14, f15, f16, f17, f18, f19, f20, f21, f22, f23, f24, f25, f26, f27, f28, f29, f30, f31, f32, f33, f34, f35, f36, f37, f38, f39, f40, f41, f42, f43, f44, f45, f46, f47, f48, f49, f50, f51, f52, f53, f54, f55, f56, f57, f58, f59, f60, f61, f62, f63}
```

Da nun der ausführbare Code des Bordnetzes mit den Topologievarianten, sämtliche Fehlerbeschreibungen und die Steuerdatei `regression.par` generiert sind, können die Simulationen auf den lokalen Rechner oder im Cluster ausgeführt werden. Im Anschluss sind die Auswertung der Simulationsergebnisse und deren Visualisierung möglich.

Aktuell werden zu jeder Topologie die Kosten bestimmt, indem 500 "Einheiten" pro PDU angesetzt werden (einstellbarer Wert) sowie das Kupfervolumen sämtlicher Leitungen aufsummiert und mit einem Kostenfaktor pro kg beaufschlagt wird. Weiterhin werden die diagnostic coverage für die sicherheitsrelevanten Verbraucher und für sämtliche Verbraucher bestimmt. Ebenso werden die aufgetretenen sicherheitsrelevanten Fehler und die nicht behobenen sicherheitsrelevanten Fehler ermittelt. Gleiches erfolgt für die nicht sicherheitsrelevanten Fehler. Folgende Abbildung zeigt eine erste grafische Darstellung der Ergebnisse sortiert nach diagnostic coverage der sicherheitsrelevanten Verbraucher, dann nach den Kosten der Topologie. Weitere Sortierkriterien wie z.B. nach ASIL sind geplant.

Topologie	Kosten	DC SR	SR Fehler	n. beh. SR Fehler	DC gesamt	NSR Fehler	n. beh. NSR Fehler
3074	3000	56%	43	19	20%	47	19
1930	2370	54%	43	20	20%	49	19
1952	2370	54%	43	20	20%	49	19
32	2400	54%	43	20	20%	49	19
1922	2400	54%	43	20	20%	49	19
1946	2420	54%	43	20	20%	49	19
1738	2440	54%	43	20	20%	49	19
1760	2440	54%	43	20	20%	49	19
26	2450	54%	43	20	20%	49	19
1538	2450	54%	43	20	20%	49	19
352	2470	54%	43	20	20%	49	19
1730	2470	54%	43	20	20%	49	19
1754	2490	54%	43	20	20%	49	19
346	2520	54%	43	20	20%	49	19
1858	2520	54%	43	20	20%	49	19
2144	2710	54%	43	20	20%	49	19
2138	2760	54%	43	20	20%	49	19
3138	2760	54%	43	20	20%	49	19
1056	2900	54%	43	20	20%	47	18
2442	2900	54%	43	20	20%	47	18
2464	2900	54%	43	20	20%	47	18
2570	2910	54%	43	20	20%	47	18
2592	2910	54%	43	20	20%	47	18
3466	2910	54%	43	20	20%	47	18
3488	2910	54%	43	20	20%	47	18
1026	2930	54%	43	20	8%	47	23

Abbildung 14: Darstellung der ausgewerteten Simulationsergebnisse, sortiert zuerst nach DC SR (diagnostic coverage der sicherheitsrelevanten Verbraucher), dann nach den Kosten der Topologie

Eine weitere sehr anschauliche Ausgabe der Simulationsergebnisse ist eine Exceldatei pro Topologievariante. Die Spalten sind die Fehlerindizes. Der erste Block der Zeilen zeigt an, ob ein eingebrachter Fehler an den Lasten erkannt wurde oder nicht. Grün bedeutet erkannt, rot nicht erkannt. Dunkelgrün sind sicherheitsrelevante Lasten markiert. Der zweite Block veranschaulicht, ob ein eingebrachter Fehler an den Lasten innerhalb des fault tolerant time intervalls behoben werden konnte oder nicht. Grün bedeutet behoben (oder keine Auswirkung auf diese Last) und rot bedeutet Fehler führte zur Verletzung des Zeitintervalls und damit zu einem Ausfall und damit zu einem möglichen Hazard. Hellrot sind hierbei sicherheitsrelevante Lasten markiert.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
error_sig_SR3	es	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	es	es	es	es	es	es
error_sig_4	e	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	e	e	e	e	e	e
error_sig_SR5	es	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	es	n	n	n	n	es	es	es	es	es	es
error_sig_6	e	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	e	e	e	e	e	e
error_sig_SR7	es	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	es	n	n	n	es	es	es
error_sig_8	e	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	e	n	e	e	e	e
error_sig_9	e	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	e	n	e	e	e	e
tte_sig_SR3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	0	0
tte_sig_4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
tte_sig_SR5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	2	0	2	0	2
tte_sig_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
tte_sig_SR7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	2	0	2	0	2
tte_sig_8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
tte_sig_9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1

33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66				
es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es				
e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e				
es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es			
e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e			
es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es	es		
e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e		
e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e		
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
0	2	2	2	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
0	2	0	0	0	0	2	0	0	2	2	0	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	
0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Abbildung 15: Visualisierung der Simulationsergebnisse - Fehlersignal und Tolerant time intervall überschritten für Topologie 3500 - oben Fehlerindizes 0 bis 32, unten 33 bis 66

Erzeugung und Anwendung von Trainingsdaten

Zur Erzeugung von Trainingsdaten für eine KI-gestützte Diagnose und ebenfalls zur Evaluation der Sicherheitsmechanismen des Bordnetzes werden diverse Verfahren verwendet, um eine hohe, möglichst vollständige Abdeckung möglicher Betriebsfälle und Fehlerszenarien zu gewährleisten. Hierfür werden unterschiedliche Methoden angewendet.

Die produktionsbedingte Schwankung der physikalischen Parameter des Systems:
 Da es in jedem Produktionsprozess gewisse Toleranzen gibt, müssen diese auch in den Simulations- oder Trainingsdaten auftauchen. Hierbei ist darauf zu achten, dass realistische Parametervariationen verwendet werden, die relevant für die Funktion und die Ausfälle des Systems und im Besonderen der Diagnosefähigkeit der Sicherheitsmechanismen sein können. In realen Anwendungen sind diese Größen und ihre Schwankungen durch Herstellerangaben oder Experimente zu bestimmen und zu verifizieren, bei der Methodikentwicklung mit einem generischen System werden sie geschätzt.

Die altersbedingte Schwankung der physikalischen Parameter des Systems:
 Jede elektronische Komponente erfährt Änderungen ihrer physikalischen Parameter im Zuge der Alterung über ihre Lebenszeit. Unterschiedliche Betriebs- und Umweltbedingungen können diesen Prozess verstärken. Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass unterschiedliche Alterungsphänomene durch unterschiedliche Bedingungen beeinflusst werden. Es ist somit möglich, dass ein gut auf hohe Temperaturen, Umgebungstemperaturen oder Eigenerwärmung, ausgelegt ist, da alle Komponenten relativ ähnlich beschleunigte Alterung unter erhöh-

ter Temperatur erfahren. Liegt allerdings eine sehr gering abweichende Spannung an (Betriebsbedingung) altern einige Komponenten dieses Systems deutlich schneller als andere. Durch die erzeugte Diskrepanz in der Parameterabstimmung kommt es in Folge schneller zu einem Ausfall oder einem Versagen des Sicherheitsmechanismus. Wird an einem generischen System gearbeitet, können für diese Schwankungen ebenfalls Annahmen getroffen werden. Hierbei ist es auch möglich, sie mit den Produktionsbedingten Schwankungen zu verbinden. Bei einem realen System sollten beide Variationen jedoch gesondert betrachtet werden, da sich hier durch Kenntnis und ggf. geschickte Auswahl der Komponenten bereits viele Problemfälle in der Alterung vermeiden lassen und somit von Anfang an Simulationsaufwand gespart werden kann und die Systeme sicherer werden.

Zufällige Fehlerinjektion bei verschiedensten Anwendungsszenarien:

Um zu vermeiden, dass die Fehler immer im „Optimalzustand“ des Systems, d.h. in dem die Diagnosefunktion am besten mit dem Fehler umgehen kann und ihn am sichersten erkennt, eingebracht werden und um die Überlagerung von unterschiedlichen Signalen und Leistungsströmen mit Fehlern darzustellen, werden möglichst viele unterschiedliche Anwendungsszenarien simulativ nachgebildet. Danach werden in jedem dieser Szenarien mehrfach zufällig Fehler eingebracht. Wichtig ist ebenfalls den realistischen Wechsel diverser Anwendungsszenarien zu simulieren. Im Falle einer realen Anwendung sollten Anwendungsszenarien basierend auf den bisherigen Anwendungen im Feld einbezogen werden.

Verbindung der unterschiedlichen Variationen:

Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Diversifikation der Simulationsszenarien werden miteinander kombiniert, um eine möglichst realistische Simulationsabdeckung zu erhalten. Hierbei wird auf Monte-Carlo-Simulationen zurückgegriffen. Die Statistiken der Parameterverteilungen sind dabei bekannt und können verwendet werden oder es kann eine Gleichverteilung angenommen werden, um einen größeren Fokus auf seltenere Szenarien zu erhalten. Die Häufigkeitsverteilung der Anwendungsszenarien kann geschätzt oder bei realen Anwendungen gemessen werden. Auch hier ist aber die Annahme einer Gleichverteilung möglich und liefert meist für die Sicherheitsmechanismen relevantere Ergebnisse.

Im Projekt untersuchtes Bordnetzmodell:

Bei den betrachteten Sicherheitsfunktionen des Bordnetzes, d.h. redundante Verbindungen, Sicherungen und Bordnetz-Backbone sind in den Simulationen Parametervariationen in der Kabeldicke, der Auslösungsgrenze (Leistung und Zeit) der Sicherungen, der Leistungsaufnahme der Verbraucher und der Energieversorgung als mögliche Parameter identifiziert worden. Diese könnten einen Einfluss auf die Funktion der Sicherheitsmechanismen haben. Da nur ein Anwendungsszenario im Arbeitskreis definiert wurde, nämlich der Fahrzyklus mit einer Überholung und folgendem Spurwechsel nach rechts sowie Weiterfahrt zur nächsten Haltebucht und dortiger Halt, wurden lediglich statistische Variationen der Leistungsaufnahme der Verbraucher und der Energieversorgung als sinnvoll betrachtet. Die Fehler können damit überlagernd zu zufälligen Zeiten eingebracht werden.

4 Ableitung von ECU-Anforderungen für die Umsetzung der Diagnosefunktionen im Fahrzeug

Um eine zielführende Anwendung der KI-basierten Diagnosefunktionen auf einer ECU im Fahrzeug gewährleisten zu können, ist es notwendig, ausreichend Ressourcen auf der jeweiligen ECU bereitzustellen. Demgegenüber ist zu prüfen/ abzuschätzen, ob eine vorgegebene ECU-Plattform die Leistungsdaten einer in jedem Falle erwartungsgemäßen Abarbeitung der Diagnosefunktion gewährleisten kann. Ist dies nicht gegeben, so sind die Diagnosemodelle für die jeweilige Zielplattform weiter zu optimieren.

Für komplexere Bordnetzdiagnosen unter Einbeziehung von Gesamtsystemen ist die Anwendung digitaler Twins zweckmäßig und daher zu prüfen.

Im Zuge höherer Anforderungen an Bordnetze steigt auch die Komplexität der zu implementierenden Sicherheits- und Diagnosefunktionen. Versorgen Bordnetze sicherheitskritische Systeme, wie ein Steer-by-Wire System, mit Energie, so ist eine klassische Schmelzsicherung nicht mehr ausreichend. Das System, genauer seine Funktion, darf auch bei einem Fehlstrom oder Kurzschluss in Teilen des Bordnetzes nicht ausfallen. Ebenfalls können neuartige Diagnosefunktionen nur durch spezialisierte Algorithmen funktionieren. Dabei kann es sich um klassische Algorithmen handeln oder um KI-basierte Funktionen. Für klassische Algorithmen, die einzelne Bauteile überwachen, hat sich in der Vergangenheit ein leistungsstarker, für sicherheitskritische Funktionen ausgelegter Automotive-Mikrocontroller (z.B. Aurix) als gut ausreichend erwiesen. Mit Blick in die Zukunft stoßen diese Controller jedoch an ihre Grenzen. Betrachtet man das Beispiel der eFuse im Auto-Bordnetz, die aus einem Leistungstransistor als Schalter und einem Mikrocontroller mit speziellen Algorithmen besteht, wird dies schnell einsichtig. Jede eFuse mit einem einzelnen Controller zu versehen ist aus Aufwands- und Kostengründen nicht vertretbar. Es werden also viele Sicherungsschalter mit einem Mikrocontroller betrieben. Hierbei werden natürlich erhöhte Anforderungen an Parallelität oder schnelle und sicher präzise getaktete sequenzielle Abarbeitung der Algorithmen, die jeden einzelnen Schalter steuern gestellt. Dies ist für den Anwendungsfall explizit zu testen.

Da es eine große Anzahl an möglichen KI-Algorithmen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Rechenleistung gibt, kann hier keine allgemeine Aussage getroffen werden. Es ist aber zu unterscheiden, ob das KI-System zu weiterem Lernen fähig sein soll, um seine individuelle Situation besser beurteilen zu können. Für Machine-Learning direkt im Fahrzeug würden Ressourcen benötigt, die weit über die Kapazitäten einer ECU hinausgehen. Wenn das Lernen mit einem externen Digitalen Zwilling erfolgen soll, ist für den Datentransport zu sorgen.

Die Anwendung digitaler Zwillinge für Bordnetze ist langfristig gesehen als sehr sinnvoll anzusehen. Nicht nur ist es möglich mit den aufgenommenen Daten neue bzw. realistischere Anwendungsszenarien und ihre Häufigkeit für die Entwicklung der nächsten Generation von Diagnosesystemen zu entwickeln, sondern sie können auch direkt die Sicherheit im überwachten Bordnetz selbst erhöhen. Dies ist einerseits dadurch möglich, dass neue Trainingsdaten für ein KI-Diagnosesystem erstellt werden können, die besser die reale Situation in diesem spezifischen Bordnetz abbilden. Andererseits können zusätzliche Simulationen durchgeführt werden, sollte der Fall auftreten, dass einzelne Parameter sich, z.B. durch Alterung, anders verändern als in der Entwicklung prognostiziert. Diese Daten können in die Simulationen aufgenommen werden und bei steigender Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls oder einer sinkenden Diagnoseabdeckung des Sicherheitsmechanismus kann reagiert werden, z.B. durch einen

Austausch der fraglichen Komponenten. Ebenfalls ist eine simulative Neubewertung bei sehr seltenen und unerwarteten Nutzungsszenarien möglich.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier dargestellten Teilprojekts wurden Importfunktionalitäten für Datenaustauschformate für Kabelbäume, wie KBL, geschaffen. JSON wurde als Datencontainer für Basiertopologie sowie den zu untersuchenden Topologievarianten gewählt. Ausführbare Bordnetzmodelle in SystemC-AMS werden aus den Angaben in diesem Datencontainer automatisch generiert. Eine grafische Benutzeroberfläche ermöglicht die intuitive Bedienung. Im Projekt wurden die Fehler über Brute Force ebenso automatisch erzeugt, d.h. jede Verbindung in jeder Topologievariante wird mit Leitungsbruch sowie Kurzschluss gegen Masse beaufschlagt. Durch Regression wird für jeden Fehler in jeder Topologie eine Simulation durchgeführt und die Simulationsergebnisse ausgewertet. Für jede Topologievariante werden die Kosten, das diagnostic coverage für die sicherheitsrelevanten Verbraucher und für sämtliche Verbraucher bestimmt. Ebenso werden die aufgetretenen sicherheitsrelevanten Fehler und die nicht behobenen sicherheitsrelevanten Fehler ermittelt. Gleiches erfolgt für die nicht sicherheitsrelevanten Fehler. Eine Tabelle am Ende der Auswertung visualisiert die besten Topologien bezüglich einstellbarer Sortierkriterien.

Abschließend wurden Überlegungen zu weiteren Trainingsdaten für eine KI-gestützte Diagnose sowie zu Anforderungen an Speicher und Leistung von ECUs angestellt.

Bei Fragen zu bzw. Interesse an den Modellbibliotheken und Algorithmen zur Codegenerierung und Regression mit automatisierter Fehlerinjektion kontaktieren Sie bitte den Arbeitskreis AK30.

6 Referenzen

- [1] Wikipedia-Artikel zu Kabelbaumliste: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kabelbaumliste> vom 12.2.2024
- [2] JSON-Formatbeschreibung. Online: <https://www.json.org/json-en.html>
- [3] Karsten Einwich, Thomas Arndt. Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, SystemC-AMS basierte Modellierung, Simulation und HiL Echtzeitsimulation für Anwendungen der Automobilelektronik. ASIM-Treffen der Fachgruppen "Simulation technischer Systeme" und "Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation" 2012

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2020)

Nr.	Titel
324	Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
325	Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
326	Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
327	Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
328	Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
329	Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
330	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
331	Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
332	Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
333	Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
334	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
335	Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
336	Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
337	Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
338	Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020
339	Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
340	Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
341	Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
342	Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
343	Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
344	Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
345	Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
346	Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021

- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022
- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023

- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023
- 377 Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, 2024
- 378 Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen, 2024

Impressum

Herausgeber

FAT
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
Behrenstraße 35
10117 Berlin
Telefon +49 30 897842-0
Fax +49 30 897842-600
www.vda-fat.de

ISSN

2192-7863

Copyright

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2024

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik